

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANALYZÁTOR SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ SPIELMANN

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# ANALYZÁTOR SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE

POWER CONSUMPTION ANALYZER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ SPIELMANN

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ GÖTTHANS, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Ondřej Spielmann

**ID:** 125640

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

### **Analyzátor spotřeby elektrické energie**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy měření napětí, proudu a výkonu ve stejnosměrných a střídavých soustavách. Na základě získaných zkušeností navrhnete měřicí systém pro monitorování základních elektrických veličin běžné domácnosti s rozhraním Ethernet.

Navržený systém prakticky realizujte a demonstруйте jeho funkčnost. Zahrňte do navrženého systému možnost zasílání uživatelských zpráv při překročení nastavených limitů. Vhodnou formou realizujte také interpretaci měřených veličin včetně možnosti klientského účtování. Dosažené výsledky srovnajte s již dostupnými řešeními.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Elektrotechnická měření. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

[2] MANN, B. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

[3] Linky, le compteur nouvelle generation[online], 2013, dostupný z WWW:  
<http://www.erdfdistribution.fr/Linky>

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Götthans, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072  
**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

## **ABSTRAKT**

Předmětem diplomové práce je seznámení s principy měření napětí, proudu a výkonu ve stejnosměrných i střídavých soustavách. Je navržen systém pro monitorování těchto veličin v rozsahu potřeb běžné domácnosti. V systému je zahrnuta možnost klientského účtování a tarifikace. Uživatelský přístup a interpretace dat je realizován na bázi rozhraní Ethernet.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

STM32, ARM, mikrontrolér, elektroměr, elektrická energie, výkon, Ethernet, spotřeba elektrické energie, STPM10, Smart Grid, Rabbit, Rabbit RCM67xx, Dynamic C

## **ABSTRACT**

The subject of master's thesis is introduction with the principles of measuring voltage, current and electrical power in DC and AC systems. Is designed measurement system for normal household. Measurement system includes pricing and client billing. User interface Ethernet-based is implemented.

## **KEYWORDS**

STM32, ARM, microcontroller, energy meter, electrical energy, electrical power, Ethernet, power consumption, STPM10, Smart Grid, Rabbit RCM67xx, Dynamic C

SPIELMANN, Ondřej. *Analýzátor spotřeby elektrické energie*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2014. 68 s. Vedoucí práce byl Ing. Tomáš Götthans, PhD.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analyzátor spotřeby elektrické energie“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Götthansovi PhD. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Teoretický rozbor</b>	<b>13</b>
1.1 Měření výkonu stejnosměrného proudu . . . . .	13
1.2 Měření výkonu střídavého proudu . . . . .	14
1.2.1 Elektrifikační soustava ČR . . . . .	16
1.2.2 Analyzátor kvality sítě . . . . .	16
1.2.3 Statický elektroměr . . . . .	16
1.3 Vývoj v měření a monitoringu spotřeby el. energie . . . . .	17
1.3.1 HDO a sítě Smart Grid . . . . .	17
1.3.2 Protokol M-BUS . . . . .	20
1.3.3 Jističe s inteligencí . . . . .	20
<b>2 Konstrukce analyzátoru spotřeby</b>	<b>22</b>
2.1 Analyzátor s MCU STMicroelectronics . . . . .	22
2.1.1 MCU - řídicí mikrokontrolér . . . . .	23
2.1.2 Měřič el. energie . . . . .	24
2.1.3 Rozhraní Ethernet . . . . .	25
2.1.4 Rozhraní M-BUS . . . . .	25
2.1.5 Úložiště dat . . . . .	26
2.1.6 Ovládání relé . . . . .	26
2.1.7 Napájení . . . . .	27
2.2 Analyzátor s MCU Rabbit . . . . .	28
2.2.1 MCU - řídicí mikrokontrolér . . . . .	28
2.2.2 Měřič el. energie . . . . .	29
2.2.3 Rozhraní Ethernet . . . . .	29
2.2.4 Ovládání relé . . . . .	29
2.2.5 Napájení . . . . .	29
2.3 Srovnání navržených konstrukcí . . . . .	30
<b>3 Softwarové řešení</b>	<b>31</b>
3.1 Struktura programu . . . . .	31
3.2 Popis úlohy TASK 1 . . . . .	33
3.3 Popis úlohy TASK 2 . . . . .	36
3.4 Popis úlohy TASK 3 . . . . .	36
3.5 Popis úlohy TASK 4 . . . . .	37
<b>4 Mechanické řešení</b>	<b>38</b>



<b>5</b>	<b>Elektrické vlastnosti a testování</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>42</b>
	<b>Literatura</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Příloha - Testovací DPS STPM10</b>	<b>49</b>
<b>B</b>	<b>Příloha - Analyzátor s MCU STMicroelectronics</b>	<b>52</b>
<b>C</b>	<b>Příloha - Analyzátor s MCU Rabbit</b>	<b>58</b>
<b>D</b>	<b>Příloha - Rozpis materiálu</b>	<b>63</b>
<b>E</b>	<b>příloha - fotodokumentace</b>	<b>65</b>
<b>F</b>	<b>Obsah elektronických příloh</b>	<b>68</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Základní varianty zapojení nepřímého měření výkonu pomocí voltmetru a ampérmetru [1] . . . . .	14
1.2	Měření činného výkonu wattmetrem [1] . . . . .	15
1.3	Schéma zapojení jednofázového statického elektroměru . . . . .	18
1.4	Schéma zapojení jednofázového statického čtyřtarifního elektroměru se zabudovaným přijímačem HDO . . . . .	18
1.5	Inteligentní jističe ABB řady SACE Emax 2 [8] . . . . .	21
1.6	Trojfázový analyzátor kvality sítě BMR PLA 33 [9] . . . . .	21
2.1	Obecná bloková struktura navrhovaného analyzátoru . . . . .	22
2.2	Vnitřní blokové schéma obvodu STPM10 [4] . . . . .	25
2.3	Příklad zapojení obvodů TSS721AD jako Slave transceiverů pro komunikaci protokolem M-BUS [11] . . . . .	26
2.4	Modul s mikrokontrolérem RCM6750 . . . . .	28
3.1	Obecná struktura programu mikrokontroléru . . . . .	33
3.2	Průběh původního signálu 3,3V (modrý) a signálu galvanicky odděleného 5V (červený), změřené zpoždění nástupných hran činilo 64,0 ns . . . . .	34
3.3	Přehled konfigurace interních registrů STPM10 . . . . .	35
3.4	Ukázka čtení 4 bytů rozhraním SPI - datový signál MISO (červený), signál CS0 (modrý) . . . . .	35
3.5	Grafické zobrazení naměřených hodnot službou Google Chart API . . . . .	37
4.1	Fotografie analyzátoru spotřeby el. energie . . . . .	39
5.1	Základní schéma zapojení při zkušebním měření . . . . .	40
5.2	Schéma zapojení pro monitorování připojeného spotřebiče s možností odpojení pomocí stykače (přes releové výstupy) při překročení nastavených mezních hodnot . . . . .	41
A.1	Schéma zapojení testovací DPS STPM10 . . . . .	49
A.2	testovací DPS STPM10 - horní strana (TOP) . . . . .	50
A.3	testovací DPS STPM10 - spodní strana (BOTTOM) . . . . .	50
A.4	Osazovací plán testovací DPS STPM10 - horní strana (TOP) . . . . .	51
A.5	Osazovací plán testovací DPS STPM10 - spodní strana (BOTTOM) . . . . .	51
B.1	Rozložení vývodů řídicího mikrokontroléru (export z programu MicroXplorer) . . . . .	52
B.2	Zapojení řídicího mikrokontroléru . . . . .	53
B.3	Zapojení rozhraní Ethernet . . . . .	54
B.4	Zapojení měřících uzlů . . . . .	55
B.5	Zapojení sběrnice Meter Bus a dalších periférií . . . . .	56

B.6	Zapojení napájecí části zařízení . . . . .	57
C.1	Zapojení MCU Rabbit, konektoru Ethernet a ostatních periférií . . .	58
C.2	Zapojení měřicího uzlu . . . . .	59
C.3	Zapojení napájecí části a ovládání kontaktů relé . . . . .	60
C.4	Motiv DPS - horní strana (TOP) . . . . .	61
C.5	Motiv DPS - spodní strana (BOTTOM) . . . . .	61
C.6	Osazovací plán DPS - horní strana (TOP) . . . . .	62
C.7	Osazovací plán DPS - spodní strana (BOTTOM) . . . . .	62
E.1	Fotografie hotového analyzátoru spotřeby el. energie . . . . .	65
E.2	Detail signalizace stavu zařízení indikačními LED diodami . . . . .	65
E.3	Detail konektoru MAGJACK, napájecího konektoru a programova- cího konektoru . . . . .	66
E.4	Detail připojení měřících svorek a svorek spínacích kontaktů relé (ne- osazené svorky tvoří rezervu pro případné inovace) . . . . .	66
E.5	Detail připojení měřících svorek a svorek spínacích kontaktů relé (ne- osazené svorky tvoří rezervu pro případné inovace) . . . . .	67

# SEZNAM TABULEK

2.1	Srovnání výkonu vybraných MCU s různými jádry . . . . .	23
4.1	Význam indikačních prvků čelního panelu analyzátoru . . . . .	38
4.2	Popis svorek analyzátoru . . . . .	39
5.1	Tabulka elektrických parametrů prototypu analyzátoru . . . . .	40
D.1	Seznam materiálu použitého pro konstrukci analyzátoru s MCU Rabbit	63

# ÚVOD

Diplomová práce se věnuje rozboru principů měření elektrických veličin potřebných pro stanovení spotřeby elektrické energie. Měření parametrů (napětí, proud, výkon) je rozebráno jak pro stejnosměrné, tak i pro střídavé soustavy elektrické energie. Rozbor je doplněn o myšlenku integrace do tzv. inteligentních sítí Smart Grid a doplnění o rozhraní M-BUS a Ethernet pro snadný odečet a vizualizaci získaných parametrů.

Na základě získaných teoretických poznatků a zkušeností je navržen měřicí systém pro monitorování výše zmíněných veličin a to v rozsahu hodnot pokrývajících parametry běžné domácnosti.

V zásadě byly navrženy dvě samostatné konstrukce, každá s odlišným řídicím centrálním prvkem. V první z nich je jádrem systému 32bitový mikrokontrolér firmy STMicroelectronics. Ve druhé konstrukci přejímá úlohu řídicího prvku mikrokontrolér Rabbit RCM z produktové řady 67xx. V obou řešeních je pro měření elektrického napětí, proudu a výkonu využito moderního integrovaného obvodu pro jednofázové měření elektrické energie STPM10.

Porovnáním kladů a záporů každého návrhu byla pro konečnou praktickou realizaci zvolena jedna z dvojice míněných konstrukcí. Na té bylo demonstrováno analyzování spotřeby elektrické energie běžné domácnosti.

# 1 TEORETICKÝ ROZBOR

Kapitola se zabývá principy měření elektrického výkonu a spotřeby, stanovením rozsahů měřených veličin a jejich přesnosti při interpretaci výsledků. Součástí kapitoly je i diskuse tématu optimálního výpočetního výkonu nutného k bezproblémovému zpracování měřených dat číslicovým systémem na bázi jednočipového mikrokontroléru.

V současné době ryze analogové měřicí přístroje výkonu, spotřeby a jiných elektrických veličin jsou na značném ústupu a uchovávají svůj význam spíše pro snadnou a rychlou interpretaci výsledků měření na odečítací stupnici. Této vlastnosti je dnes u analogových měřících přístrojů využíváno například v soustavách a rozvodnách vysokých napětí a v rozvodnicích nízkého napětí v průmyslových podmínkách, kde plní funkci prvotního indikačního prvku přítomnosti elektrického proudu, napětí atp. Význam analogových měřících přístrojů se ztrácí také zejména v souvislosti s navazujícím zpracováním získané informace a jejich ukládáním. V oboru měření spotřeby elektrické energie se v praxi dnes setkáváme výhradně s elektroměry elektromechanickými nebo plně digitálními - všichni tuzemští dodavatelé elektrické energie dnes využívají výhradně plně digitální elektroměry. Práce se i proto dále zabývá pouze číslicovými systémy měření elektrické energie.

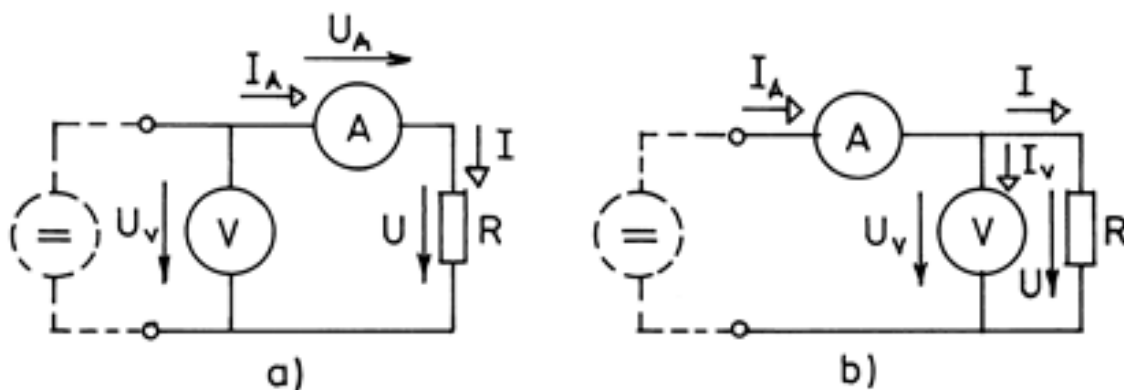
## 1.1 Měření výkonu stejnosměrného proudu

V soustavách stejnosměrného proudu je výkon na určitém prvku, například zátěži  $R_Z$ , dán vztahem [2]:

$$P_Z = U_Z \cdot I_Z \quad [W; V, A] \quad (1.1)$$

Veličina  $I_Z$  představuje proud procházející zátěží  $R_Z$  a  $U_Z$  je napětí měřené na jejích svorkách. Protože v obvodech stejnosměrného proudu není napětí  $U_Z$  vůči proudu  $I_Z$  fázově posunuto, jako je tomu v obvodech střídavých proudů, lze tento výkon na prvku měřit pouze za pomoci voltmetru a ampérmetru. Tato metoda je nepřímou metodou měření. Uspořádání měřících přístrojů v tomto způsobu měření je dvojí, jak ukazuje Obr. 1.1. V zapojení b) ampérmetr měří nejen proud  $I$  tekoucí do zátěže, ale i proud  $I_V$  tekoucí voltmetrem. Proud tekoucí voltmetrem je pak dán jeho vnitřním odporem a odchylka skutečné hodnoty výkonu na zátěži od změřené hodnoty bude mít velikost danou vztahem (výkon ztracený ve voltmetru) [2]:

$$\Delta P = U \cdot I_V \quad [W; V, A] \quad (1.2)$$



Obr. 1.1: Základní varianty zapojení nepřímého měření výkonu pomocí voltmetru a ampérmetru [1]

Pro variantu měření a) bude situace analogická. Voltmetr bude měřit i úbytek napětí vzniklý na ampérmetru. Tento úbytek bude přímo úměrný velikosti vnitřního odporu ampérmetru a velikosti proudu jím procházejícího. Nejjednodušší cestou k odstranění výše popsanych vznikajících chyb měření u nepřímé metody je modifikovat zapojení b) tak, že do větve voltmetru je zařazen spínač, který při odečítání hodnoty proudu na ampérmetru, zamezí průchodu proudu přes voltmetr [1].

## 1.2 Měření výkonu střídavého proudu

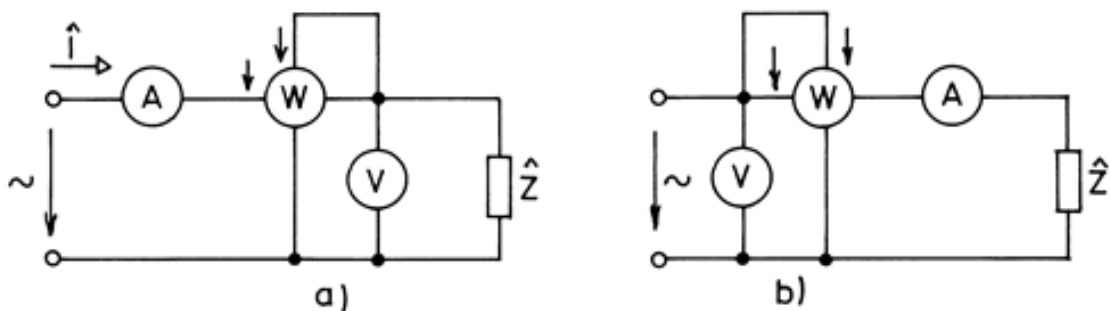
Okamžitý výkon střídavého elektrického proudu  $i$  v čase  $t$  je dán vztahem [2]:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad [W; V, A] \quad (1.3)$$

Dle fázových poměrů mezi proudem a napětím rozlišujeme výkon činný  $P$  [W], jalový  $Q$  [Var] a zdánlivý  $S$  [W]. Činný výkon je charakterizován nevratnou změnou elektrické energie v energii užitečnou (teplo). Odpovídá též střední hodnotě harmockého průběhu střídavého proudu a lze ji vyjádřit vztahem [2]:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [W; V, A, -] \quad (1.4)$$

Měření činného výkonu provádíme nejčastěji střídavým wattmetrem, viz. Obr. 1.2. Ampérmetry a voltmetry slouží ke stanovení správného rozsahu wattmetru. Člen  $\cos \varphi$  se nazývá účinník a vyjadřuje poměr mezi velikostí činného a zdánlivého výkonu, resp. vyjadřuje fázový posuv mezi napětím a proudem.



Obr. 1.2: Měření činného výkonu wattmetrem [1]

Jalový výkon  $Q$  vyjadřuje vratnou proměnu energie na vytvoření elektrického a magnetického pole. Jedná se o kvantum energie, která je přesouvána mezi zdrojem elektrické energie a spotřebičem. Velikost kvanta lze vyjádřit jako [2]:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad [VAr; V, A, -] \quad (1.5)$$

Jalový výkon lze snadno odvodit od velikosti činného výkonu a fázového posuvu mezi proudem a napětím. Pro přímé měření jalového výkonu zapojíme před svorky měření napětí wattmetru fázovací článek, který zajistí fázový posuv  $90^\circ$  mezi napětím a proudem. V trojfázových soustavách odpadá nutnost výskytu fázovacího článku - zapojení na Obr. 1.2 a) se modifikuje do podoby, kdy je napěťová svorka zapojena mezi fáze, ve kterých se nevykazuje obvod měření proudu. Velikost jalového výkonu ve trojfázové soustavě pro výše popsanou modifikaci má velikost [2]:

$$Q_{3f} = 3 \cdot \frac{Q}{\sqrt{3}} \quad [VAr; VAr] \quad (1.6)$$

Hodnota zdánlivého výkonu  $S$  je ve střídavé jednofázové síti definována jako součin napětí a proudu. Vyjadřuje míru výkonové zatížitelnosti střídavých zařízení [2].

$$S = U \cdot I \quad [VA; V, A] \quad (1.7)$$

Je měřen nejčastěji nepřímou metodou vycházející z metody nepřímého měření výkonu ve stejnosměrné soustavě a pro třífázové sítě je definován jako součet jednotlivých dílčích zdánlivých výkonů.

Uváděná zapojení se v praxi často doplňují o transformátory proudu nebo napětí, případně kombinace obou způsobů.



### 1.2.1 Elektrifikační soustava ČR

Vytyčení pojmu *přenosová soustava* odpovídá rozmezí vedení a zařízení sloužící k přenosu elektrické energie od jejího výrobce k odběrateli, tj. do rozvodu VVN/VN. Část elektrifikační soustavy od rozvodny VVN/NN směrem ke koncovému odběrateli je nazývána *distribuční soustava*. Jedná se o případy klasického typizovaného modelu a toto rozdělení se může lišit dle lokálních podmínek a konvencí distributorů el. energie. Provozovatelem monopolní elektrifikační přenosové soustavy v ČR je ČEPS, a.s. Sít je tvořena vedeními VVN o hodnotách sdružených napětí 400 kV, 220 kV a 110 kV. Součástí přenosové soustavy je rovněž systém transformátorových stanic a spojovacích uzlů s ostatními evropskými provozovateli přenosových soustav. Jednou z hlavních náplní činnosti ČEPS, a.s. je také regulace zatížení částí přenosové soustavy a následná korekce pomocí vlastních korekčních prostředků.

*Distribuční soustava* je vzájemně propojený soubor vedení zajišťující rozvod z přenosové soustavy ke koncovému spotřebiteli. Soustava pracuje s napětími v rozmezí 0,4 kV až 110 kV (sdružená napětí). Dělbá distribuční soustavy z hlediska velikosti napětí je následující:

- VVN (velmi vysoké napětí) - jmenovité sdružené napětí 110 kV,
- VN (vysoké napětí) - jmenovité sdružené napětí 22 kV resp. 35 kV (pro oblast Východních Čech),
- NN (nízké napětí) - jmenovité sdružené napětí 400 V.

### 1.2.2 Analyzátor kvality sítě

Vyskytují-li se v síti poruchy, výpadky, rušení a jiné negativní jevy, slouží k jejich odhalení analyzátor kvality sítě. Přístroj je schopen monitorovat dlouhodobé i krátkodobé jevy a zpracovávat data z několika sítí zároveň v případě, že hrozí vzájemné ovlivnění sítí. Charakteristickými vlastnostmi měřících přístrojů jsou vícecestné svorky pro analýzu napětí, proudů, kmitočtu sítě atp. Nasazení analyzátorů kvality sítě si žádá o značné finanční prostředky, avšak někdy bývá nutností.

### 1.2.3 Statický elektroměr

Elektroměr v němž proud a napětí působí na pevné statické elektronické prvky tak, že vytváří výstupní signál úměrný měřené energii. V současnosti se jedná o nejrozšířenější prostředek k měření spotřeby v oblasti koncového spotřebitele (domácnosti) za účelem fakturace nákladů spojených s odběrem el. energie. Přibližně od roku 2000 probíhala v ČR celoplošná výměna starších typů elektromechanických elektroměrů za nové a přesnější digitální statické elektroměry bez pohyblivých částí. Odečet u

těchto nových typů se provádí přímo ze zabudovaného displeje nebo mechanického číselníku, případně pomocí sondy s optickým rozhraním. Nejnovější jsou vybaveny dálkovým odečtem přes sběrníkové rozhraní M-BUS. Rozsah zobrazované informace se může lišit dle konkrétního typu elektroměru, standardem bývá zobrazení nejméně pěti celých a jedno desetinné místo. Pro montáž v domácnostech se v současné době využívá možnost snímání jednotarifní (T1) nebo dvoutarifní (T1/T2) sazby. Přepínání mezi tarify se děje v závislosti na přijímaném kódu HDO.

Dvousazbové elektroměry jsou nejvíce montovány do prostředí, kde se vyskytují elektricky náročnější zařízení (bojler, el. vytápění domu, aj.) nebo do průmyslových objektů/továren s elektricky poháněnými stroji o velkých příkonech. Činnost těchto zařízení o větších příkonech je provozována právě v době tarifu s nižší cenovou sazbou - typicky ohřívání vody v bojleru. Dříve se pro cenově výhodnější tarif také užíval název *noční proud*. Ten je však v dnešní době zavádějící. Časy sepnutí výhodnějšího tarifu pro určitou lokalitu lze vždy nalézt na stráčkách distributora elektrické energie. V průmyslu není nasazení dvousazbové tarifikace tak časté, řeší se spíše individuální smlouvou s distributorem el. energie. Distributor v případě velkých nároků odběrného místa vyžaduje zřízení místní trafostanice s regulátory účinníku.

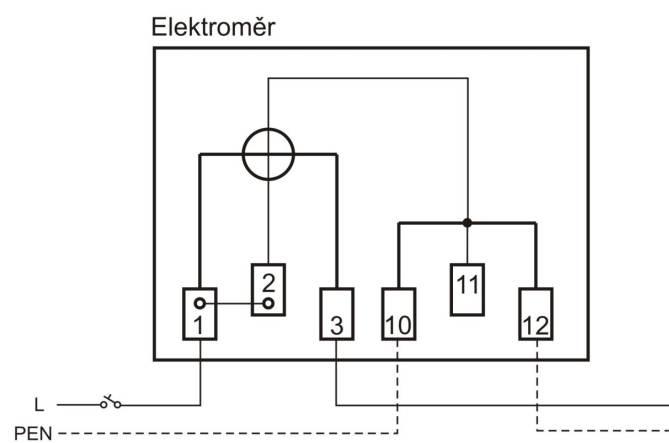
Metrologické požadavky elektroměrů označovaných EHS (elektroměry schválené dle zákona č.505/1990 Sb.) pro použití v obytných a obchodních prostorách a v lehkém průmyslu stanoví vyhláška na požadavky pro nová, přímo připojená indukční měřidla elektrické energie s jedním nebo více tarify navržená pro měření činné energie jednofázového nebo vícefázového proudu s kmitočtem 50 Hz a s třídou přesnosti 2.

Stanovené pracovní podmínky elektroměrů, jejich dovolenou maximální chybu měření a bezpečnostní pokyny, které jsou nutné k tomu, aby elektroměr splnil atestaci Českého metrologického institutu jsou zaneseny v dokumentu opatření obecné povahy číslo 0111-OOP-C022-11 a dalších příslušných zákonech.

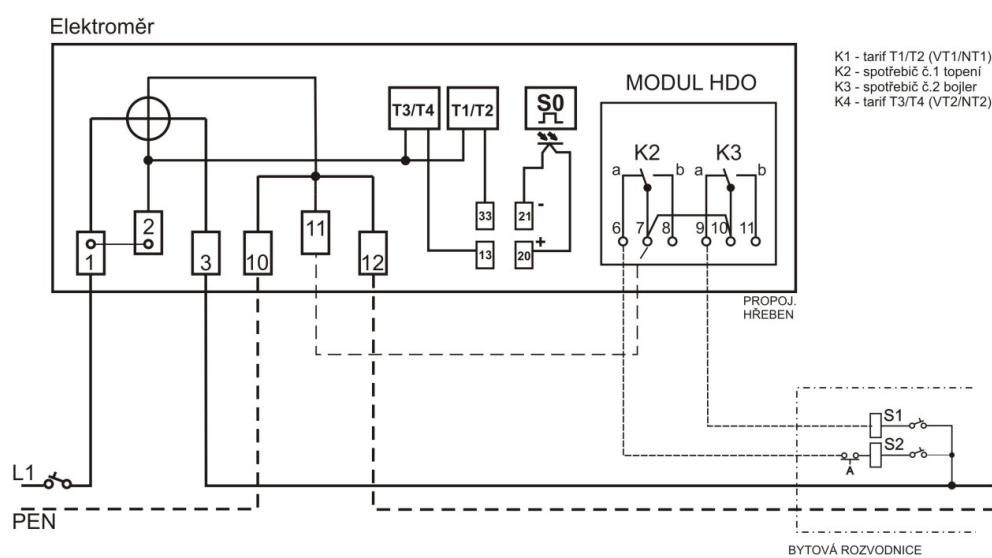
## 1.3 Vývoj v měření a monitoringu spotřeby el. energie

### 1.3.1 HDO a síť Smart Grid

Hlavní myšlenkou hromadného dálkového ovládání (HDO) i inteligentní sítě Smart Grid je docílit rovnoměrnějšího odběru elektrické energie v rozvodné síti a tím snížit celkový objem vyráběné el. energie potřebné k pokrytí potřeb koncových spotřebitelů dané sítě. HDO i Smart Grid používají k dosažení rovnoměrného stavu vytížení



Obr. 1.3: Schéma zapojení jednofázového statického elektroměru



Obr. 1.4: Schéma zapojení jednofázového statického čtyřtarifního elektroměru se zabudovaným přijímačem HDO

sítě podobných metod avšak s různými stupni a druhy řízení stavu dané sítě.

Princip HDO spočívá v přenosu informace prostřednictvím silového vedení. Informace je vysílána s frekvenční řádu jednotek až desítek kHz a má podobu impulsního kódu. Vysílač HDO informaci superponuje na základní frekvenci energetické sítě. Informace je vysílána do všech fázových vodičů vysokého napětí. Informace se pak šíří i přes transformátorové stanice až do okruhů nízkého napětí, kde je připojen koncový spotřebitel (domácnost). Na straně spotřebitele dekóduje přijímač HDO (nejčastěji je součástí dvousazbového elektroměru) vysílanou sekvenci a rozhodne například o připojení energeticky náročnějších spotřebičů (bojler, elektrické vytápění, aj.) k elektrickému proudu prostřednictvím stykače v době s nižší cenou odebírané elektrické energie - levnější provoz pro spotřebitele. Pro využití různého účtování odběru el. energie je vyžadována přítomnost dvousazbového elektroměru, který počítá spotřebu odděleně pro nízký a vysoký tarif. V České republice existují čtyři druhy povelů HDO:

- K1 - přepínání mezi nízkým a vysokým tarifem,
- K2 - zapnutí/vypnutí ovládaného el. spotřebiče (např. bojler),
- K3 - zapnutí/vypnutí dalšího ovládaného el. spotřebiče (např. akumulární kamna),
- K4 - servisní účely.

Alternativou k systému HDO může být systém RHDO, kde je signál s povely pro přijímač přenášen radiovým prostředím. HDO resp. RHDO lze využít také například k ovládání veřejného osvětlení a ke sdělovacím účelům v průmyslových podmínkách. S nástupem fotovoltaických elektráren se tento systém řízení částečně uplatnil i zde.

Koncept Smart Grid neboli inteligentních sítí pracuje s myšlenkou restrukturalizace elektrifikačního souboru zdrojů a odběrných míst. Současná energetická infrastruktura je ve velké většině případů realizována jako lokální hvězdicová topologie s centrálně umístěným zdrojem. Hvězdicová topologie vyniká svou snadnější výstavbou, než jiné topologicky složitější a sofistikovanější topologie, ale čím dál méně umožňuje uspokojovat zvyšující se nároky na přísun el. energie. Jediným řešením zvyšující se poptávky je v takovém případě navýšení kapacity zdrojů a přenosových soustav. Zbudování inteligentní sítě se snaží zefektivnit využívání zdrojů el. energie na principu nabídka-poptávka. Platnost principu je možná díky obousměrné komunikaci mezi zdroji a spotřebními místy. Ve spojení s komunikačními sítěmi dokáží řídicí automatizované prvky provádět korekci v reálném času a předcházet tzv. blackoutům. Nesporná výhoda inteligentní sítě spočívá v efektivním zapojení lokálních

zdrojů energie (např. místní solární elektrárny) do budované infrastruktury. Uplatní se zde prvky automatizace a řízení, viz kapitola 1.3.3. Diskutabilní je otázka bezpečnosti a ochrana soukromí u těchto typů sítí.

V České republice se jedná zatím pouze o pilotní provoz společnosti ČEZ, a.s. v regionu Vrchlabí v rámci projektu Smart Region [10].

### 1.3.2 Protokol M-BUS

Jedná se o poměrně nový evropský standard protokolu pro dálkový odečet hodnot z měřičů spotřeby el. energie, tepla a jiných měřících zařízení. Dálkovým odečtem chápeme vzdálenost řídicího prvku (Master) od prvku podřízeného (Slave) do vzdálenosti 1000 m pro symbolovou rychlost 300 baud. Pro maximální komunikační rychlost je maximální délka omezena na 350 m. Na takto tvořené asynchronní sběrnici může být připojeno maximálně 250 zařízení typu Slave.

Ve fyzické vrstvě reprezentuje ve směru od zařízení Master ke Slave logickou jedničku úroveň napětí 36 V a logickou nulu napětí 24 V. V opačném směru Slave-Master se hodnota informace váže na odběr proudu zařízením Slave. Pokud Slave odebírá 1,5 mA (a méně) je hodnota právě čteného bitu rovna 0. V případě odběru vyššího nebo rovného hodnotě 10 mA je signalizována logická jednička. Struktura vysílaného nebo odesílaného rámce dat má podobu rámce standardu RS232, tj. 8 bitová komunikace s volitelnou paritou.

Současnou evolucí protokolu M-BUS je jeho modifikovaná bezdrátová varianta Wireless M-BUS [11].

### 1.3.3 Jističe s inteligencí

Prvním a prozatím jediným dostupným jističem elektrického proudu disponujícím inteligencí regulace spotřeby je model SACE Emax 2 od firmy ABB. Jistič je vybaven kontrolním softwarem, který vyhodnocuje s ohledem na uživatelské nastavení, aktuální trend spotřeby elektrické energie v daném okruhu zapojení a dle toho reguluje tok el. proudu prostřednictvím ochranného relé s vestavným ovladačem výkonu. Jistič je dále schopen regulovat stav připojené zátěže díky zabudovaným výkonovým rezistorům a předcházet tzv. blackoutům (výpadkům) dodávky el. energie v rámci širšího okruhu koncových spotřebitelů.

V jističi je implementována podpora sítí Smart Grid a dalších potřebných komunikačních standardů. Efektivním zapojením chytrých prvků je tak (dle propočtů fy ABB) možné snížit spotřebu el. energie běžné domácnosti až o 15 % [8].



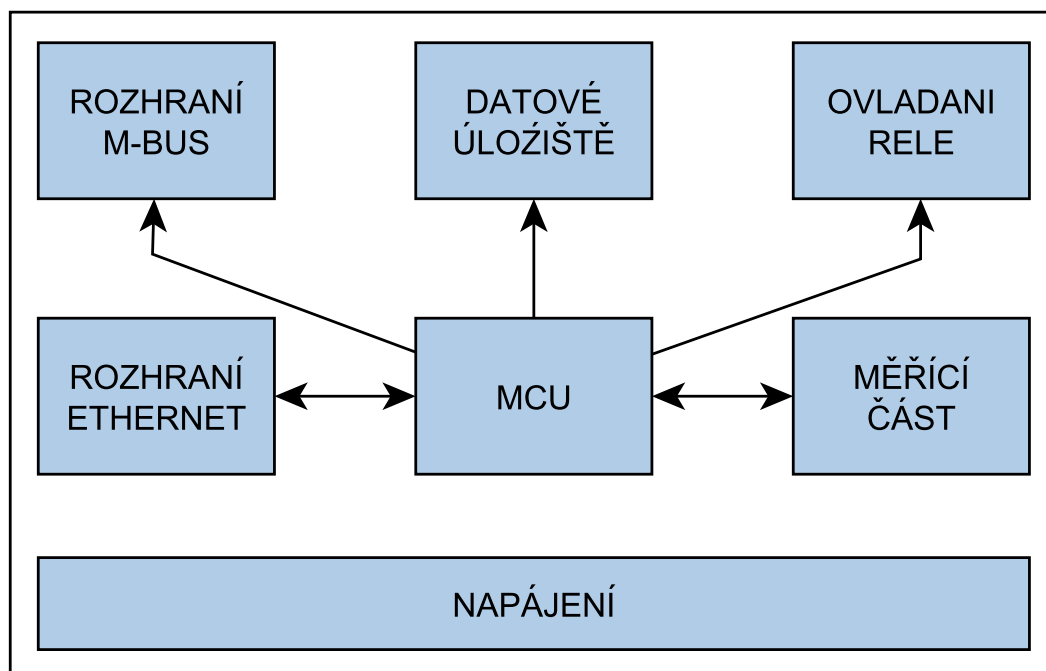
Obr. 1.5: Inteligentní jističe ABB řady SACE Emax 2 [8]



Obr. 1.6: Trojfázový analyzátor kvality sítě BMR PLA 33 [9]

## 2 KONSTRUKCE ANALYZÁTORU SPOTŘEBY

Koncept analyzátoru spotřeby je postaven na úvaze jednoduchého funkčního řetězce: měření-zpracování-interpretace. U každého dílčího bloku je stanovena jeho hlavní funkce, prioritní požadavky a je vybrán konkrétní typ použité části hardware.



Obr. 2.1: Obecná bloková struktura navrhovaného analyzátoru

### 2.1 Analyzátor s MCU STMicroelectronics

Byla zvolena koncepce na bázi řízení jednočipovým mikrokontrolérem s připojenými periferními obvody pro získání a následnou interpretaci měřených veličin. Obecný popis činnosti uváděného zařízení lze popsat následovně: MCU čte data přicházející z měřicí části, následně je vhodným způsobem zpracuje a uloží v bloku datového úložiště. V závislosti na požadavcích zadání MCU zobrazuje data v uživatelsky přívětivém formátu rozhraním Ethernet a na vyžádání nadřazeného systému busu M-BUS, poskytuje této sběrnici výsledky analýzy měřené spotřeby. V závislosti na uživatelsky nastavovaných konvencích MCU ovládá reléové kontakty sloužící k připojení resp. odpojení fázových vodičů vybraných připojených okruhů síťového rozvodu el. energie nebo k dalšímu ovládání stykačů a relé.

### 2.1.1 MCU - řídicí mikrokontrolér

Jako centrální řídicí prvek měřicího systému je zvolen mikrokontrolér z rodiny STM32 firmy STMicroelectronics. Tyto mikrokontroléry jsou postaveny na 32bitovém jádře ARM (Advanced RISC Machine) Cortex-M, disponují velice příznivými hodnotami v poměru cena/výkon a dobrou podporou ze strany výrobce. Z této rodiny byla vybrána řada STM32F1, která disponuje od výrobce podporou pro implementování ethernetového rozhraní a webového serveru.

Ze zvolené řady STM32F1 nejlépe odpovídá požadavkům konstrukce mikrokontrolér STM32F107 vyráběný v několika variantách lišících se dle počtu vývodů a velikostí paměti FLASH. Vybrán byl typ STM32F107RCT6, disponující následujícími parametry a jeho klíčovou vlastností je přítomnost rozhraní Ethernet. Výčet některých vlastností STM32F107RCT6 [12]:

- Frekvence jádra procesoru 72 MHz
- Velikost paměti FLASH 256 kB
- Velikost paměti RAM 64 kB
- Jádro ARM Cortex-M3
- 16bit.čítač (7x)
- Rozhraní USART (5x), SPI (3x), I2C (1), I2S (2), USB OTG, CAN (2x), Ethernet
- Watchdog (2x)
- 12bit. ADC převodník (16x)
- DAC převodník (2x)
- Napájecí napětí 2,0 V až 3,6 V
- Pouzdro: LQFP 64

Tab. 2.1: Srovnání výkonu vybraných MCU s různými jádry

Jádro	Řada	Rychlost	DMIPS	DSP	FPU	Určení
Cortex-M4	STM32F4	180MHz	225	Ano	Ano	Zpracování signálů
Cortex-M4	STM32F3	72MHz	90	Ano	Ano	Zpracování signálů
Cortex-M3	STM32F2	120MHz	150	Ne	Ne	Výkonově vylepšená řada F1
Cortex-M3	STM32F1	72MHz	61	Ne	Ne	Univerzální řada
Cortex-M3	STM32L1	32MHz	33	Ne	Ne	Nízkopříkonové aplikace
Cortex-M0	STM32F0	48MHZ	38	Ne	Ne	Prvotní aplikace s STM32

Základní zapojení vybraného MCU vychází z katalogového listu. Část napájení úseku MCU je posílena o externí baterii CR2023V, která zajistí chod mikrokontroléru v případech výpadků hlavní napájecí větve. Taktovací pracovní kmitočet jádra



mikrokontroléru je odvozen od připojeného externího krystalu Q1 o jmenovité frekvenci 25 MHz. Krystal Q6 poskytuje referenci pro zdroj reálného času. Pro indikaci stavu řídicího prvku jsou připojeny diody LED10 a LED11, které informují o správném chodu a právě probíhajícím režimu činnosti. Programování a ladění softwaru MCU je využito hardwarových prostředků JTAG. Konektor SV1-JTAG je zapojen pro použití s prostředkem ST-LINK/V2 (programátor/debugger).

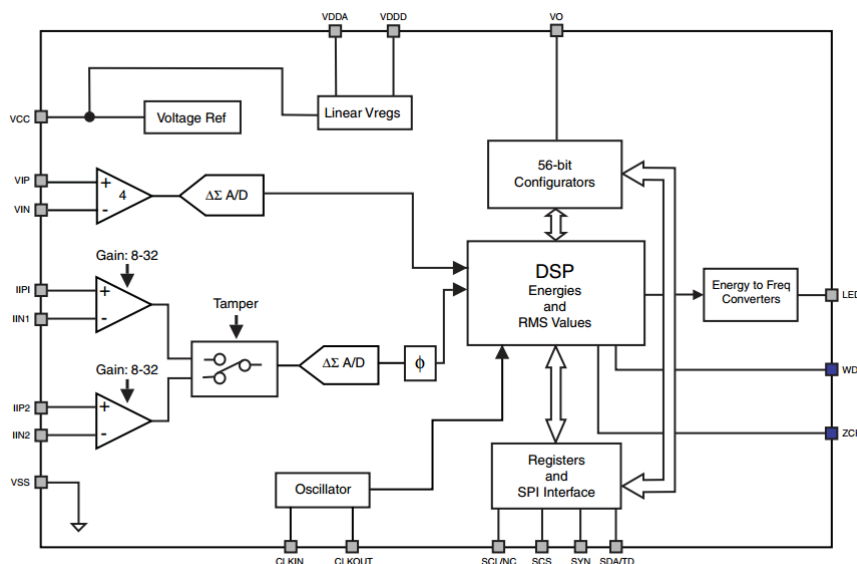
### 2.1.2 Měřič el. energie

Měřicí prvek konstrukce představuje moderní integrovaný obvod STPM10. Oproti konkurenčním řešením vyniká velmi příznivými metodami implementace, dispozicí knihoven od výrobce a příznivou cenou. V jednom pouzdře TSSOP-20 jsou obsaženy vstupní programovatelné zesilovače, dvojice ADC 18bit.  $\Sigma\Delta$  převodníků, napěťová reference, místní oscilátor, jednotka zpracování DSP a převodník pro impulsní výstup. Obvod je výrobcem interpretován jako jednofázový měřič elektrické energie s digitální jednobodovou kalibrací. Komunikace s okolím probíhá na modifikovaném rozhraní SPI (je pouze jeden datový vodič pro oba směry komunikace a jeho směr je zvolen v závislosti na úrovni synchronizačního signálu).

Obvod má vstupy pro průběžné měření proudu označené  $I_{IP1}$ ,  $I_{IN1}$ ,  $I_{IP2}$  a  $I_{IN2}$ . Vstupy pro měření napětí nesou označení  $V_{IP}$  a  $I_{IN}$ . Měřič tedy dokáže pracovat v režimu dvou zapojených proudových větví a jedné napěťové svorky. V realizovaném zapojení mohou být dvojice svorek pro měření proudů spojeny v případě, kdy směr proudu procházejícího přes vložený vodič jdoucí skrz oko proudového transformátoru má být nezávislý. Maximální napětí na vstupech je na hodnotě 0,7 V - proto musí být zapojeny externí součástky k dosažení provozních rozsahů měřiče. Typickými převodními mechanismy jsou proudové transformátory, bočníky a rogowského cívka. Výrobce garantuje v případech správné aplikace maximální chybu měřené veličiny menší než 0,1%.

Vynucených externích součástek je minimum (viz. příloha, schéma B.4). Proud vodičem připojeným ke svorkám měření proudu (ve schématu označeno jako "PROUDOVE SVORKY") je měřen přes proudový transformátor AC1050 s převodním poměrem 1:1000 a maximálním proudem měření 50A. Použití měřícího proudového transformátoru je výhodné kvůli jeho dostatečné linearitě převodu i díky velkému pracovnímu proudovému rozsahu. Napětí je měřeno na svorkách "NAPETOVE SVORKY" přes kaskádu tří sériově zapojených rezistorů ve vývodovém provedení k zajištění elektrické pevnosti. Dále je již jen vyžadován externí krystalový oscilátor a sada filtračních kondenzátorů. Připojená LED dioda signalizuje činnost impulsního výstupu [4].

Kompletní schéma uvádí celkem 3 měřiče STPM10 galvanicky oddělené od mikrokontroléru obvody ADUM1400 a ADUM1401. LED diody LED2, LED3, LED4 a LED5 mají funkci indikace právě zvoleného prvku na sběrnici SPI - detekují aktivní signál SlaveSelect (SS).



Obr. 2.2: Vnitřní blokové schéma obvodu STPM10 [4]

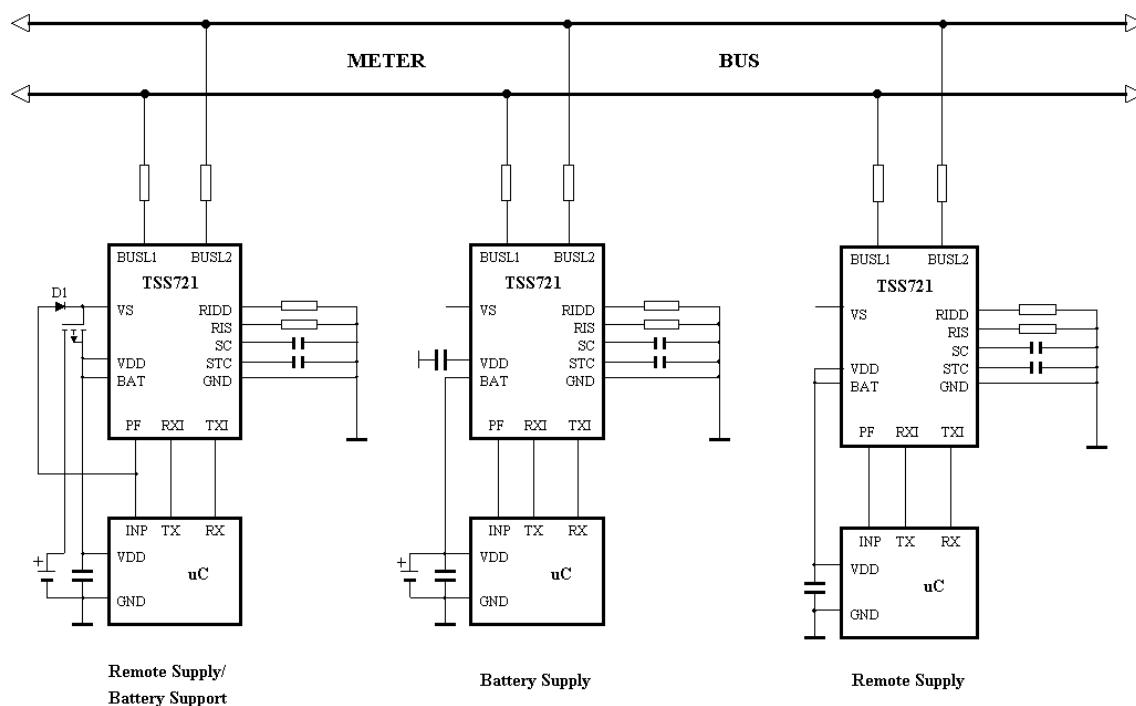
### 2.1.3 Rozhraní Ethernet

Hardware komunikace přes ethernetové rozhraní je tvořen ze dvou částí. První část tvoří transceiver DP83848 schopný přenosu informace ve standardu 10/100 Mbit/s a konektor RJ-45 s převodním transformátorem. Transceiver (vysílač/přijímač) vkládá do konstrukce částečnou nezávislost (RMII) na použitém hardwaru z hlediska vnějšího přístupu na médium. Druhou částí je samotný mikrokontrolér na kterém je programově implementován webový server. Zapojení transceiveru je vyobrazeno ve schématu B.3. Jedná se o katalogové zapojení dle [7].

### 2.1.4 Rozhraní M-BUS

V návaznosti na kapitolu 1.3.2 v teoretické části práce byla implementována fyzická vrstva protokolu M-BUS. Hlavní část fyzické vrstvy tvoří integrovaný obvod TSS721AD realizující potřebné napěťové a proudové hodnoty popsané v teoretickém rozboru sběrnice M-BUS. Obvod vytváří na sběrnici zařízení charakteru Slave a dokáže po ní komunikovat plnou rychlostí 9600 baud. Výměna informací mezi mikrokontrolérem STM32F107 a TSS721AD představuje rozhraní UART, které je

galvanicky odděleno obvodem ADUM1201. Takto se zajistí i správné úrovně napětí pro MCU a M-BUS transceiver. Jumper JP1 slouží k přepínání rozhraní UART MCU pro komunikaci přes M-BUS nebo přes sériové rozhraní [11].



Obr. 2.3: Příklad zapojení obvodů TSS721AD jako Slave transceiverů pro komunikaci protokolem M-BUS [11]

### 2.1.5 Úložiště dat

Slouží k uložení měřených dat a následnému vyčítání hodnot. Představuje archiv informace i pro stav, kdy zařízení nekomunikuje s okolím. Jako výchozí úložiště je v systému zabudována karta formátu micro SD, resp. patice pro její vložení. Přístup ke kartě je založen na bázi softwarem realizovaného rozhraní SPI. Hardwarové rozhraní SPI slouží výhradně k obsluze měřičů energie STPM10. Bylo tak učiněno kvůli možným časovým kolizím při programové obsluze paměťové karty a následné komplikaci při vývoji ovládacího softwaru. Schéma zapojení paměťové karty a rozhraní M-BUS je uvedeno v příloze ve schématu B.5.

### 2.1.6 Ovládání relé

Pro možnost aktivního zásahu do připojeného rozvodného systému domácnosti byla zakomponována čtyři relé RAS-0515 určená pro napětí střídavé sítě 230 V. Jejich

spínání se provádí přes galvanicky oddělené tranzistorové spínací prvky. Proud každým relé může dosahovat hraniční hodnoty až 15 A. Takto je zajištěna jistá myšlenka realizace připojení nebo odpojení daných okruhů rozvodu v rámci požadavku, který bude vydán mikrokontrolérem. Lze tak odpojit například zařízení s příliš velkým odběrem nebo připojit prvek jen v určitém časovém období. V některých případech by se určitě našlo uplatnění i jako řídicí prvek regulace účinníku.

### **2.1.7 Napájení**

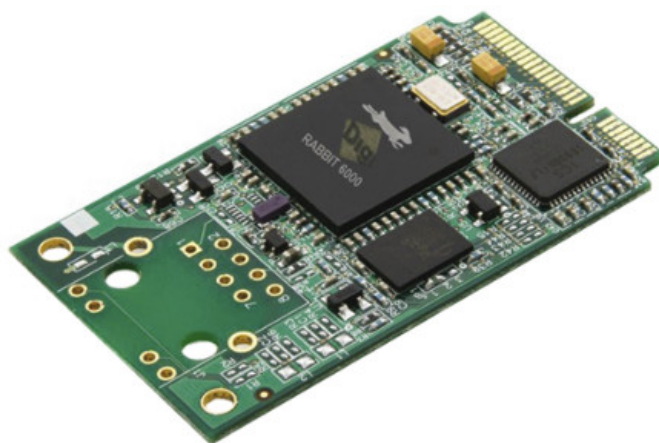
Předložená konstrukce je napájena síťovým střídavým napětím 230 V s kmitočtem 50 Hz. Z napájecích svorek je proud transformován pomocí TR4 na hodnotu 12 V. Následně je usměrněn a stabilizován na úroveň napětí 5 V. Následně je z 5 V větve pomocí DC/DC měniče odděleno napětí 3,3 V potřebných pro řídicí logiku zařízení. Kompletní zapojení zdroje je uvedeno spolu se zapojením releové části ve schématu B.6.

## 2.2 Analyzátor s MCU Rabbit

Koncepce analyzátoru je v podstatě ideově totožná s koncepcí předešlé uváděné konstrukce. Mikrokontrolér Rabbit obsluhuje všechny potřebné úkony spojené s prací vlastního měření a interpretací získaných dat.

### 2.2.1 MCU - řídicí mikrokontrolér

Pro obsluhu veškerých činností spojených s funkcí analýzy spotřeby el. energie a obsluhy rozhraní Ethernet byl zvolen mikrokontrolér resp. modul s mikrokontrolérem Rabbit RCM6750. Modul je osazen vlastním procesorem a nachází se něm i zdroje hodinových signálů (krystalové rezonátory), ochranné a další podpůrné obvody pro jednodušší implementaci do cílové konstrukce.



Obr. 2.4: Modul s mikrokontrolérem RCM6750

Výčet některých klíčových vlastností MCU Rabbit RCM6750 [13].

- Frekvence jádra procesoru až 200 MHz
- Velikost paměti FLASH 4 MB
- Velikost interní paměti SRAM 1 MB
- Velikost baterií zálohované paměti SRAM 32 kB
- 8bit.čítač (10x), 10bit. čítač (1x)
- Rozhraní USART (2x), SPI (4x), I2C (1x), Ethernet 10/100 Base-T, Mass Storage (FLASH)
- Watchdog, RTC
- Napájecí napětí 3,3 V
- Typický udávaný proudový odběr výrobcem: 250 mA (s komunikací Ethernet), 130 mA (bez komunikace Ethernet)

- Konektor procesorového modulu: 52-pin Mini PCI Express 64

### 2.2.2 Měřič el. energie

Ke snímání elektrických veličin je použita část zapojení totožná jako u návrhu analyzátoru s MCU STMicroelectronics, viz kapitola 2.1.2.

### 2.2.3 Rozhraní Ethernet

Rozdíl od předešlé konstrukce spočívá ve fyzickém uspořádání rozhraní Ethernet - transceiver PHY (fyzická vrstva Ethernetu) je již integrován přímo v základní desce s MCU. Tato skutečnost vede ke zjednodušení zapojení a zejména k eliminaci chyb při špatném návrhu DPS vzhledem k zachování signálové integrity. V konečném důsledku je tedy MCU připojen přímo ke konektoru typu MAGJACK, který v sobě ukrývá konektor RJ-45 i převodní transformátor

### 2.2.4 Ovládání relé

Řídící mikrokontrolér je přes IO ULN2003AD (sedminásobné pole bipolárních tranzistorových párů v zapojení typu Darlington) schopen budit ovládací cívky kontaktů relé G5V1-5. Paralelně k ovládací cívkce relé není potřeba osazovat ochrannou diodu - obsahuje ji budící IO. Relé jsou zakomponovány v celkovém počtu čtyř kusů a mohou být využity například pro spínání stykačů schopných odpojení přetížené části elektrického rozvodu domácnosti.

### 2.2.5 Napájení

Napájení uvedené konstrukce analyzátoru s MCU Rabbbit je vyžadováno přivedením z externího zdroje stejnosměrného nesymetrického napětí o jmenovité hodnotě 5 V s minimální proudovou zatížitelností 0,5 A. Vhodné řešení napájecího zdroje pro analyzátor je v provedení s uchycením na lištu DIN (konstrukce analyzátoru předpokládá instalaci do rozvodné skříně el. rozvodu domácnosti). Mikrokontrolér je napájen přes lineární stabilizátor 3,3 V. Galvanicky oddělená část (měřicí část s IO STPM10) je napájena prostřednictvím DC/DC měniče napětí s jmenovitým vstupním i výstupním napětím 5 V a maximálním výstupním výkonem 1 W (maximální výstupní proud měniče 200 mA). Schéma zapojení napájecí části je uvedeno spolu s částí pro ovládání releových kontaktů ve schématu C.3.

## 2.3 Srovnání navržených konstrukcí

Prvotní srovnání obou uvedených konstrukcí zjišťuje nepoměrnou jednoduchost zapojení s MCU Rabbit vůči verzi s mikrokontrolérem STMicroelectronics. U verze s MCU Rabbit jsou již na dodávaném modulu implementovány zdroje hodinových signálů i vlastní napájecí části. Vytváření motivu plošného spoje (routování) je v oblasti stavby prototypů a malosériových výrobků tedy do jisté míry ulehčeno. Další nespornou výhodou je možnost výměny modulu, která se provádí prostým vyjmutím modulu z patice Mini PCI Express a je ho možné nahradit jiným modulem ze stejné produktové řady. Lze tak velice snadno osadit například modul s integrovaným rozhraním WIFI nebo modul s menším výkonem jádra mikrokontroléru atp.

Zjednodušení konstrukce s MCU Rabbit přichází také v podobě prostoru pro ukládání naměřených dat a využití pouze jednoho měřiče el. energie STPM10. Paměťový prostor je nyní situován do samotného modulu mikrokontroléru s velikostí interní FLASH paměti 4 MB. Velikost úložiště je sice v porovnání s paměťovou kartou SD nesrovnatelně nižší, pro účely analyzátoru se však jeví dostačující a v případě požadavku na rozšíření je možnost uploadu dat například na FTP server či datové úložiště některé cloudové služby.

Nevýhodou konstrukce s MCU Rabbit je nepřítomnost napájecí struktury přímo ze síťového rozvodu NN a řešení tak vyžaduje užití externího napájecího zdroje o jmenovitém výstupním napětí 5 V DC. Konstrukce je dále ochuzena o rozhraní M-BUS. Tato skutečnost není ale větším negativním faktorem z důvodu prozatimní malé rozšířenosti dálkového odečtu elektroměrů v podmínkách běžných domácností.

Po diskusi předložených faktů bylo pro hmotnou realizaci zvoleno řešení konstrukce využívající mikrokontrolér Rabbit RCM6750 a následující rozbor tvorby ovládacího softwaru se týká pouze této platformy.

## 3 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ

Vývoj ovládacího softwaru pro mikrokontrolér Rabbit RCM6750 probíhal v prostředí Dynamic C (verze 10.72), které zahrnuje editor kódu, kompilátor, linker, programování mikrokontroléru i debugging. Prostředí primárně předpokládá vývoj softwaru ve standardu jazyka C obohaceného o real-time processing a kooperativní multitasking. Kooperativní multitasking je reprezentován návěstím *costate*, které představuje řetězení obsažených funkcí s možností stanovení priority přidělování hardwarových prostředků mikrokontroléru. Každá jednotlivá úloha v multitaskingu je tak tvořena v podstatě obalem návěstí *costate*, které odpovídá jedné vykonávané úloze.

### 3.1 Struktura programu

Strukturu ovládacího programu lze snadno vyčíst z obr. 3.1. Po připojení napájecího napětí proběhne inicializace/nastavení vlastního mikrokontroléru, nastavení směru vstupně-výstupních portů, nastavení sériového rozhraní a ověření komunikace s měřičem spotřeby el. energie STPM10. Poté je na základě hodnoty zadané parametru TCPCONFIG nakonfigurováno síťové rozhraní TCP/IP. Knihovní funkce dovoluje využití statické IP adresy, ale i možnost dynamického přidělení prostřednictvím DHCP serveru. V předkládaném řešení řídicího softwaru je makrem `#define TCPCONFIG 5` nastaveno dynamické přidělení IP adresy.

Následující krok zavede v ovládacím programu samotné úlohy (*TASK*) pro řešení čtyř dílčích požadavků zařízení:

- Úloha 1 (*TASK 1*) – vlastní měření elektrických veličin
- Úloha 2 (*TASK 2*) – zpracování, formátování a uložení získaných dat
- Úloha 3 (*TASK 3*) – interpretace výsledků měření
- Úloha 4 (*TASK 4*) – ovládání ostatních periférií (LED, relé)

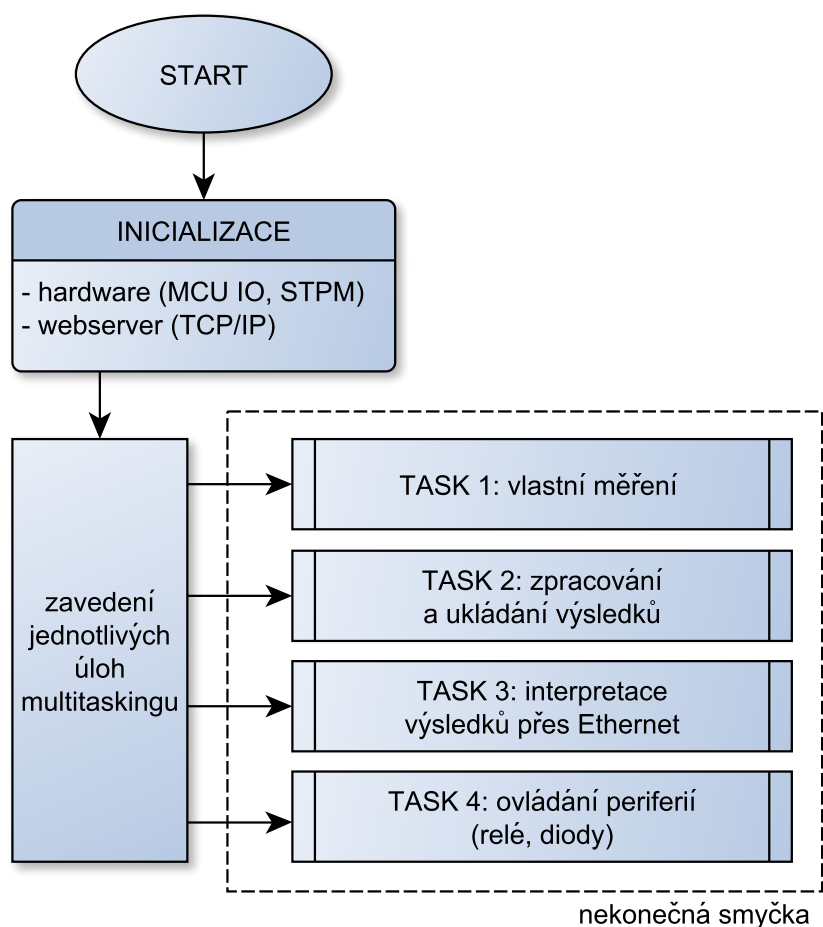


Zdroj. kód 3.1: symbolický přepis struktury ovládacího softwaru - ukázka vytvoření úloh multitaskingu za pomoci příkazu *costate*

---

```
1 void main()
2 {
3     initGPIO(); // inicializace pinu MCU
4     initSTPM(); // inicializace rozhraní SPI a IO STPM10
5     initHTTP(); // inicializace vykreslování web. stránek
6
7     while (1) // start nekonečné smyčky
8     {
9         costate {
10             // TASK 1: vlastní měření
11         }
12
13         costate {
14             // TASK 2: zpracování dat
15         }
16
17         costate {
18             // TASK 3: zobrazení www
19         }
20
21         costate {
22             // TASK 4: ovládání periférií
23         }
24     }
25 }
```

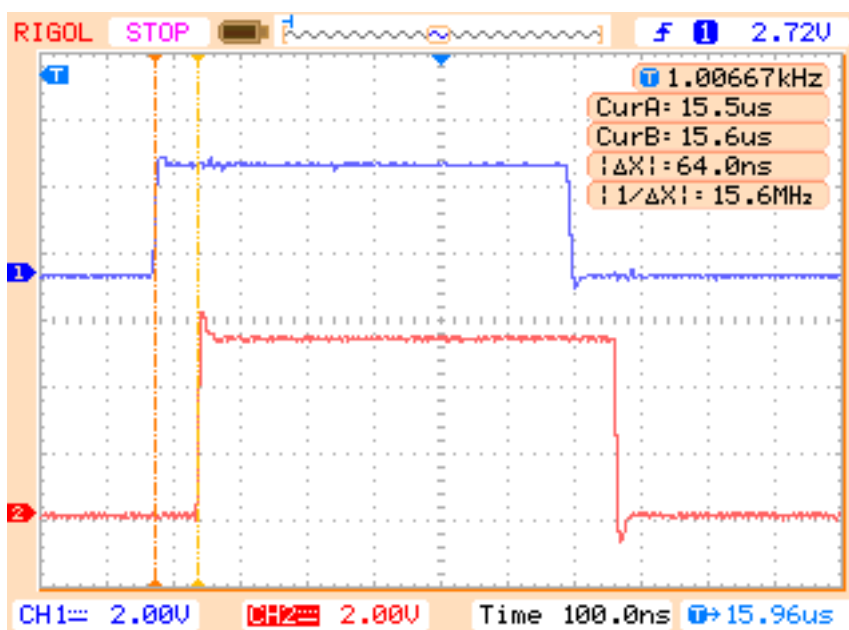
---



Obr. 3.1: Obecná struktura programu mikrokontroléru

## 3.2 Popis úlohy TASK 1

Vlastní komunikace s měřičem STPM10 probíhá na bázi hardwarového rozhraní SPI. Datové signály *MISO* a *MOSI* jsou spolu s hodinovým signálem, signálem *CS0* a signálem pro výběr směru komunikace *SYNC* vedeny přes galvanické oddělení. Na IO galvanického oddělení byl zjištěn vznik zpoždění v řádu desítek ns, jak ukazuje obr. 3.2. Tento fakt je vzhledem k rychlosti komunikace mezi MCU a STPM10 zanedbatelný. V knihovně přístupující k nejnížší vrstvě komunikace přes rozhraní SPI je zakomponováno ovládání signálu *SYNC* a jsou postupně vyčítány registry STPM10 s aktuálními hodnotami měření. Každý registr obsahuje 4 x 8 bytů (celkem tedy 32 bitů). První 4 bity každého registru jsou paritní, další struktura se u různých registrů liší. Přehled uspořádání registrů STPM10 je vyobrazen na obr. 3.3. Příklad datové komunikace vyobrazuje obr. 3.4.



Obr. 3.2: Průběh puvodního signálu 3,3V (modrý) a signálu galvanicky odděleného 5V (červený), změřené zpoždění nástupných hran činilo 64,0 ns

Úloha předává změřené hodnoty prostřednictvím globální struktury úloze TASK 2. Volání obsluhy měření by nemělo být nikdy rychlejší než vykonávání úlohy pro zpracování dat. V případě zájmu o měření parametrů sítě včetně projevů harmonických zkreslení až do například řádu 10. harmonické složky zvolíme s rezervou (při respektování Shannon-Kotělnikova teorému) periodu snímání 1200 Hz.



## 3.3 Popis úlohy TASK 2

Data přejatá z úlohy TASK 1 jsou zkontrolována doporučenou rutinou kontroly pomocí paritních bitů a jsou dle struktury registru rozdělena do hodnot jednotlivých veličin měření. Samotné veličiny jsou upraveny potřebnými matematickými aparáty na podobu skutečných výsledků měření. Výsledky jsou uloženy v lokální paměti pro další zpracování.

## 3.4 Popis úlohy TASK 3

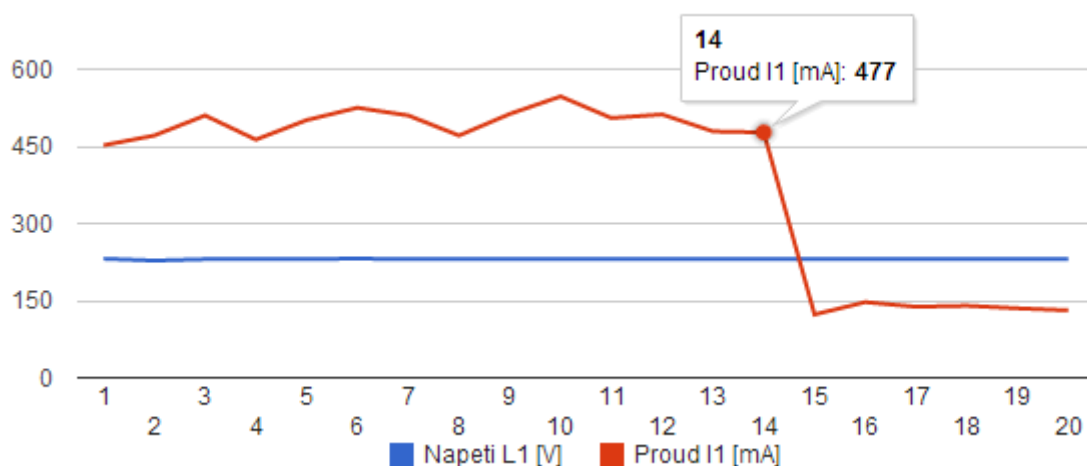
Úloha přejímá zodpovědnost za interpretaci rozhraním Ethernet. O základní grafické zobrazení historie změřených hodnot se stará služba Google Chart API, která dynamicky vykresluje předložená data. Jedná se o velice jednoduchou variantu grafického projevu se snadnou implementací. Nevýhoda Google Chart API spočívá v nutnosti přístupu k Internetovému připojení.

Zdroj. kód 3.2: ukázka zdrojového kódu pro dynamické vyobrazení Google Chart API

---

```
1      <script type="text/javascript" src="https://www.google.com/jsapi">
2      </script>
3      <script type="text/javascript">
4          google.load("visualization", "1", {packages:["corechart"]});
5          google.setOnLoadCallback(drawChart);
6          function drawChart() {
7              var data = google.visualization.arrayToDataTable([
8                  ['Time', 'Napeti L1 [V]', 'Proud I1 [mA]'],
9                  ['1',   uRMS[0],      iRMS[0]],
10                 ['2',   uRMS[1],      iRMS[1]],
11                 ['3',   uRMS[2],      iRMS[2]],
12                 ['4',   uRMS[3],      iRMS[3]],
13                 ['5',   uRMS[4],      iRMS[4]],
14             ]);
15
16             var options = {title: '-', curveType: 'none',
17                 legend: {position: 'bottom'} };
18             var chart =
19                 new google.visualization.LineChart
20                     (document.getElementById('chart_div'));
21             chart.draw(data, options);}
22     </script>
```

---



Obr. 3.5: Grafické zobrazení naměřených hodnot službou Google Chart API

### 3.5 Popis úlohy TASK 4

Tato úloha obsluhuje periferie připojené k MCU Rabbit. Jedná se o LED diody signalizující stav zařízení - stavová tabulka 4.1 a osazená relé. Doporučený napěťový rozsah ovládaných releových kontaktů dosahuje hodnoty 125 V AC a proto je vhodné pro ovládání jiných prvků doporučeno použít vložený stykač s ovládacími kontakty příslušného rozsahu. Příklad je uveden na obr. 5.2

## 4 MECHANICKÉ ŘEŠENÍ

Mechanická kompozice analyzátoru spočívá v umístění osazené DPS do plastové krabičky určené k montáži na lištu DIN (ČSN EN 60715). Rozměry krabičky jsou 106 x 90 x 58 mm (odpovídá šířce 6M). Vrchní prostor krabičky obsahuje svorky pro připojení napájecího napětí, programovací konektor a zkratovací propojku (určena pro mód programování). Zde je umístěn i konektor MAGJACK pro spojení rozhraním Ethernet. Prostor spodního okraje vyplňují svorkovnice kontaktů relé a měřicí svorky napětí a proudu, vedle kterých je osazena rezervní čtyřnásobná svorkovnice. Popisky jednotlivých svorek jsou uvedeny přímo na DPS a jejich význam lze nalézt v tabulce 4.2.

Deska plošných spojů byla navržena s ohledem na přítomnost síťového napětí 230 V. Byl kladen důraz na zachování dostatečných izolačních mezer mezi částmi pod měřeným napětím (resp. měřeným proudem) a částmi napájenými malým bezpečným napětím samotných měřicích prvků. Obě části analyzátoru jsou od sebe galvanicky odděleny a svorky pro připojení měřicích bodů jsou násuvného provedení pro vyšší míru bezpečnosti.

Na čelním panelu jsou umístěny čtyři světlovody (vyvedeno od LED diod umístěných na DPS), které informují uživatele o aktuálním stavu zařízení. Význam indikace je uveden v tabulce 4.1.

Celá konstrukce analyzátoru je postavena v zájmu zásad RoHS - směrnice evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. Směrnice klade důraz na omezení výskytu šesti chemických látek (kadmium, rtuť, olovo, šestimocný chróm, polybromované bifenyly a polybromované difenylethery) při výrobě elektrického a elektronického zařízení a tím přispět k ochraně lidského zdraví a životního prostředí.

Tab. 4.1: Význam indikačních prvků čelního panelu analyzátoru

Barva	Označení	Význam	Zhasnuta	Blikání	Trvalý svit
Modrá	MĚŘENÍ	stav měření	neprobíhá	mimo rozsah	OK
Zelená	ETHERNET	stav rozhraní Ethernet	chyba	—	OK
Červená	STATUS	celkový stav analyzátoru	vypnuto	—	OK
Červená	x 0,1 kWh	impulsní optický výstup	impuls při kvantu energie		



Obr. 4.1: Fotografie analyzátoru spotřeby el. energie

Tab. 4.2: Popis svorek analyzátoru

Popis svorky	Význam svorky
L	Měřicí bod napětí, fázový vodič
N	Měřicí bod napětí, nulový (střední) vodič
II	Měřicí bod proudu, vstup fázového vodiče (od zdroje)
IO	Měřicí bod proudu, výstup fázového vodiče (ke spotřebiči)
CON1	Spínací kontakt relé K1
CON2	Spínací kontakt relé K2
CON3	Spínací kontakt relé K3
CON4	Spínací kontakt relé K4
+5V	Kladný potenciál napájecího napětí
GND	Nulový/zemní potenciál napájecího napětí
Ethernet	Připojení konektoru RJ-45
JP1	Zkratovací propojka (spojeno = prog. mód)
PROG	Programovací konektor
NC	Nezapojeno

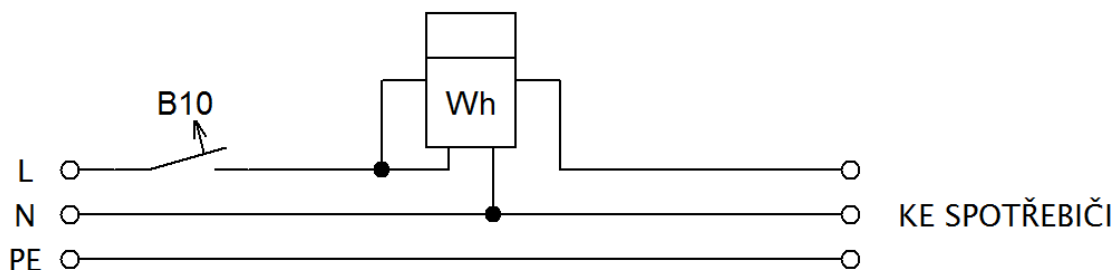


## 5 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI A TESTOVÁNÍ

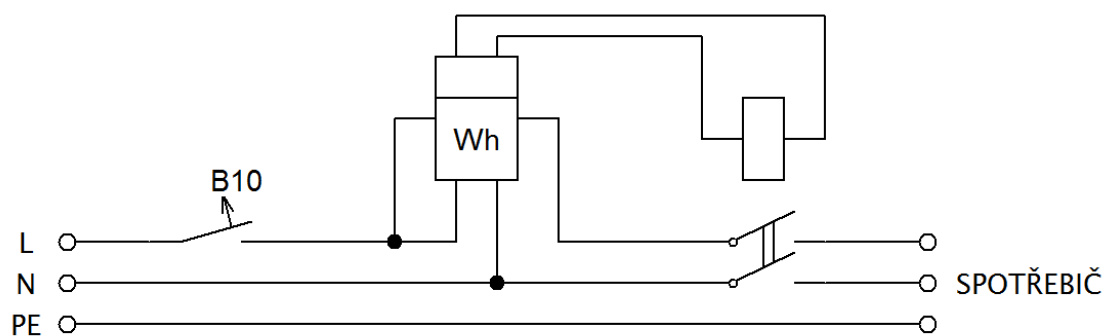
Testování probíhalo připojením různých spotřebičů elektrické energie nacházejících se běžně v domácnosti (lampička, elektrické topítko aj.). Získané poznatky a odvozená provozní doporučení jsou uvedena v tabulce 5.1 a význačné parametry jsou uvedeny také na štítku čelního panelu analyzátoru. Třída přesnosti je stanovena s poměrně velkou rezervou, se kterou lze při měření v domácnosti spokojit. Pro získání podrobnějších představ o skutečné přesnosti měřených veličin je vhodné provést rozsáhlejší proceduru kalibrace nebo provést ověření přesnosti u některé metrologické instituce.

Tab. 5.1: Tabulka elektrických parametrů prototypu analyzátoru

Parametr	hodnota
Napájecí napětí	5 V DC
Minimální proudový odběr (bez Ethernetu)	0,265 mA
Minimální proudový odběr (s Ethernetem)	0,480 mA
Minimální vlastní spotřeba (bez Ethernetu)	1,4 W
Minimální vlastní spotřeba (s Ethernetem)	2,7 W
Dosažená třída přesnosti	TP 1 AC
Minimální vstupní napětí	60 V AC
Maximální vstupní napětí	250 V AC
Minimální frekvence sítě	45 Hz
Maximální frekvence sítě	65 Hz
Maximální proud (proud přes TR1)	15 A AC
Stupeň krytí	IP20/00



Obr. 5.1: Základní schéma zapojení při zkušebním měření



Obr. 5.2: Schéma zapojení pro monitorování připojeného spotřebiče s možností odpojení pomocí stykače (přes releové výstupy) při překročení nastavených mezních hodnot

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámení se s principy měření základních veličin ve stejnosměrných i střídavých soustavách a ze získaných zkušeností vycházet při návrhu konstrukce analyzátoru spotřeby elektrické energie. Konstrukce má umožnit monitorování základních veličin a interpretaci výsledků rozhraním Ethernet.

Úvod do zadané problematiky byl prostudován jak na bázi teoretické, prostřednictvím vhodné dostupné literatury, tak na bázi praktické, formou spolupráce s pracovištěm vývoje přesných elektroměrných zařízení v Brně. Získaných poznatků bylo následně využito při vlastním návrhu měřicího systému. Topologie konstrukce byla navrhována s ohledem na dostupnost jednotlivých součástí a přiměřenou složitost a rozsah celé konstrukce vzhledem k povaze zadané úlohy.

Byla navržena dvě řešení hardwarové části analyzátoru, každá s jiným ústředním řídicím prvkem v podobě mikrokontroléru. V prvním navržené konstrukci zodpovídá za chod analyzátoru mikrokontrolér STMicroelectronics STM32F107 s podporou rozhraní Ethernet. Konstrukce navíc obsahuje obvod transceiveru pro komunikaci protokolem M-BUS pro dálkový odečet a správu elektroměrných a regulačních zařízení. V konstrukci druhé plní úlohu centrálního řídicího prvku modul mikrokontroléru Rabbit RCM6750. Výhoda modulu mikrokontroléru spočívá ve snažší implementaci a možnosti jisté modularity (dle osazeného konkrétního typu modulu). Lze tak velice snadno změnou modulu docílit jiného přístupového média, například v podobě WIFI. V obou případech předložených konstrukcí provádí měření integrovaný měřič elektrické energie s označením STPM10 a je v obou případech využito stejného zapojení. Při pohledu na obě řešení vyniká to s mikrokontrolérem Rabbit a to zejména díky své jednoduchosti a ovládací software analyzátoru byl tvořen právě pro toto řešení.

Software zařízení byl vytvořen v prostředí Dynamic C. Hlavními pilíři programového vybavení analyzátoru jsou čtyři úlohy využívající kooperativní multitasking. Rozdělení ovládacího softwaru na úlohy představuje výhodu snažší implementace nových částí a funkcí, snadnější přehled nad strukturou běhu programu a v neposlední řadě možnost prioritního řízení přidělování hardwarových prostředků mikrokontroléru a jejich efektivnější využití.

V oblasti mechanického zpracování byla zvolena varianta umístění do krabičky na standardizovanou lištu DIN, kde analyzátor najde nejvhodnější pozici pro konání svého stanoveného účelu. V rámci ochrany zdraví a zejména přírody lze uvést, že analyzátor byl realizován v rozmezí směrnic RoHS.

Na hotovém prototypu analyzátoru bylo provedeno testovací měření a stanovení jeho orientačních provozních elektrických vlastností. V rámci pokračujícího vývoje a budoucích inovací lze předpokládat drobné úpravy hardwaru a zásah do ovládacího

programu analyzátoru za účelem dosažení zlepšení přesnosti měření elektrických veličin.

# LITERATURA

- [1] *Elektrotechnická měření*, 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0022-9.
- [2] DIETMEIER, Ulrich. *Vzorce pro elektroniku*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 255 s. ISBN 80-860-5653-8.
- [3] BLAHOVEC, Antonín. *Základy elektrotechniky v příkladech a úlohách: učebnice pro SPŠ s výukou předmětu Základy elektrotechniky*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1999, 248 s. ISBN 80-030-0108-0.
- [4] Katalogový list výrobce ST Microelectronics. *STPM10* [online]. 2010, poslední aktualizace 29. 1. 2013 [cit. 11. 10. 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00278872.pdf>>.
- [5] Katalogový list výrobce ST Microelectronics. *AN2159* [online]. 2005, poslední aktualizace 26. 8. 2010 [cit. 13. 10. 2013]. Dostupné z URL: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/technical/document/application\\_note/CD00057234.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/technical/document/application_note/CD00057234.pdf)>.
- [6] Katalogový list výrobce ST Microelectronics. *STEVAL-IPE018V1* [online]. 2011, poslední aktualizace 22. 12. 2011 [cit. 13. 10. 2013]. Dostupné z URL: <[http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00045237.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00045237.pdf)>.
- [7] Katalogový list výrobce Texas Instruments. *DP83848* [online]. 2012, poslední aktualizace 20. 12. 2012 [cit. 15. 10. 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/an/snla076a/snla076a.pdf>>.
- [8] Katalogový list výrobce ABB. *Emax2* [online]. 2012, poslední aktualizace 11. 2012 [cit. 15. 10. 2013]. Dostupné z URL: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/cbd96b4c9390350bc1257b4800498fdd/\\$file/1SDC007410G0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/cbd96b4c9390350bc1257b4800498fdd/$file/1SDC007410G0201.pdf)>.
- [9] Katalogový list výrobce BMR. *PLA 33* [online]. 2013, poslední aktualizace 5. 2013 [cit. 1. 3. 2014]. Dostupné z URL: <<http://content.media.cebit.de/media/000103/0103754eng.pdf>>.
- [10] Webové stránky korporace ČEZ, a.s. *Smartgrids* [online]. 2013, poslední aktualizace 15. 12. 2012 [cit. 15. 12. 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.futuremotion.cz/smartgrids/cs/index.html>>.

- [11] Webové stránky M-BUS *M-BUS* [online]. 2013, poslední aktualizace 15.12. 2012 [cit. 15. 12. 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.m-bus.com/default.php>>.
- [12] Katalogový list výrobce STMicroelectronics. *STM32F107* [online]. 2012, poslední aktualizace 11. 2012 [cit. 15. 10. 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00220364.pdf>>.
- [13] Katalogový list výrobce Digi Technologies. *RABBIT RCM6750* [online]. 2012, poslední aktualizace 9. 2012 [cit. 15. 4. 2014]. Dostupné z URL: <[http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001108\\_H.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001108_H.pdf)>.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

M-BUS Meter-Bus

MCU Microcontroller Unit

Wireless M-BUS Wireless Meter-Bus

ARM Advanced RISC Machine

RISC Reduced Instruction Set Computing

DMIPS Dhrystone Million Instruction Per Second

DSP Digital Signal Processing

LQFP Low Profile Quad Flat Package

IO Integrovaný obvod

FPU Floating Point Unit

RAM Random Access Memory

SRAM Static Random Access Memory

PCI Peripheral Component Interconnect

WIFI Wireless Ethernet Compatibility Alliance

USART Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter

SPI Serial Peripheral Interface

I2C Inter-Integrated Circuit

I2S Inter-IC Sound

USB Universal Serial Bus

OTG On The GO

CAN Controller Area Network

ADC Analog-to-digital converter

DAC Digital-to-analog converter

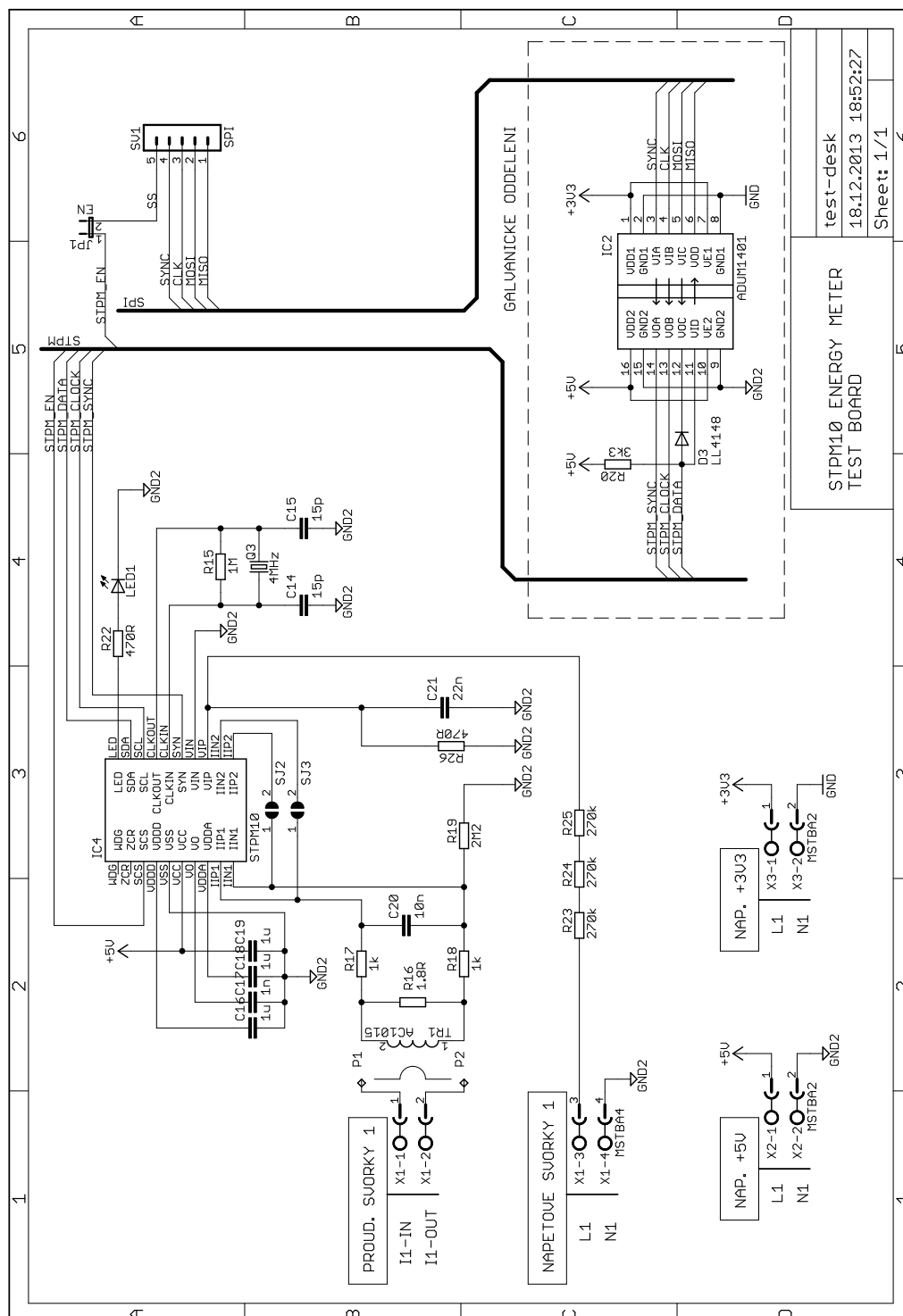
HDO Hromadné dálkové ovládání

RHDO	Radiové hromadné dálkové ovládání
DPS	Deska plošných spojů
VVN	Velmi vysoké napětí
VN	Vysoké napětí
NN	Nízké napětí
EHS	Environment, Healt & Safety
LED	Light Emitting Diode
RMI	Reduced Media Independent Interface
PHY	Physical Layer
DC	Direct Current
AC	Alternate Current
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
CSV	Comma Separated Values
SELV	Safety Extra-Low Voltage
ČSN	česká statní norma / česká technická norma
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment
API	Application Programming Interface
$u(t)$	veličina okamžité hodnoty elektrického napětí v čase $t$ , jednotka $V$ ( <i>volt</i> )
$i(t)$	veličina okamžité hodnoty elektrického proudu v čase $t$ , jednotka $A$ ( <i>ampér</i> )
$p(t)$	veličina okamžité hodnoty elektrického výkonu v čase $t$ , jednotka $W$ ( <i>watt</i> )
$U$	veličina elektrického napětí, jednotka $V$ ( <i>volt</i> )

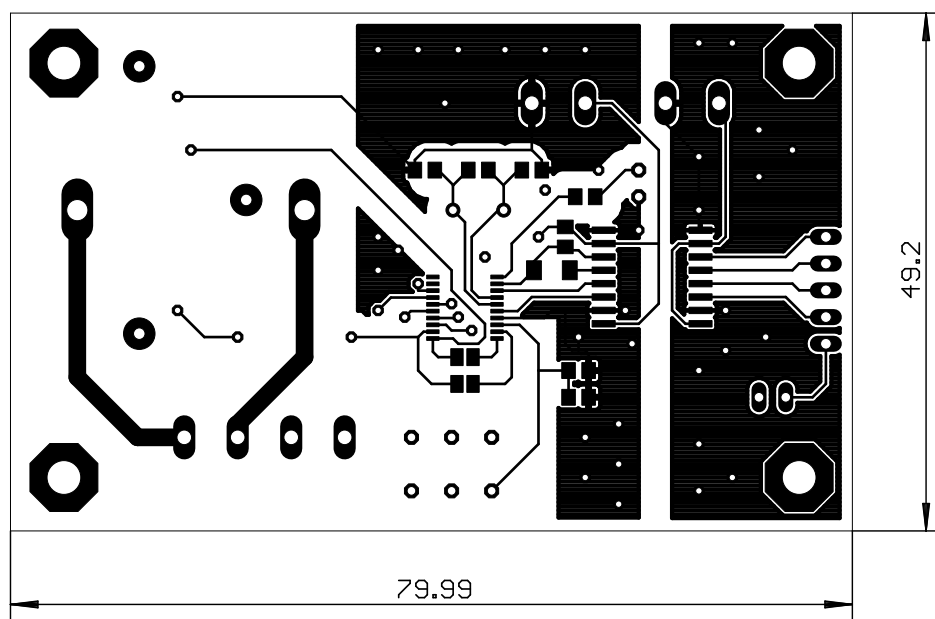


$I$	veličina elektrického proudu, jednotka $A$ ( <i>ampér</i> )
$R$	veličina elektrického odporu, jednotka $\Omega$ ( <i>ohm</i> )
$P$	veličina elektrického výkonu (stejnosměrný nebo střídavý činný), jednotka $W$ ( <i>watt</i> )
$Q$	veličina elektrického jalového výkonu, jednotka $VAr$ ( <i>voltampér reaktanční</i> )
$S$	veličina elektrického zdánlivého výkonu, jednotka $VA$ ( <i>voltampér</i> )
$U_z$	veličina elektrického napětí změřená na svorkách zátěže $R_z$ , jednotka $V$ ( <i>volt</i> )
$I_z$	veličina elektrického proudu protékajícího reálnou zátěží $R_z$ , jednotka $A$ ( <i>ampér</i> )
$R_z$	veličina udávající hodnotu reálné zátěže, jednotka $\Omega$ ( <i>ohm</i> )
$P_z$	veličina elektrického výkonu změřená na reálné zátěži $R_z$ , jednotka $W$ ( <i>watt</i> )
$I_v$	veličina elektrického proudu tekoucího voltmetrem, jednotka $A$ ( <i>ampér</i> )
$\Delta P$	odchylka skutečné hodnoty výkonu na zátěži $R_z$ od změřené hodnoty $P_z$ , jednotka $W$ ( <i>watt</i> )
$\varphi$	veličina fázového posuvu mezi el. proudem a el. napětím, jednotka <i>rad</i> ( <i>radián</i> )
$Q_{3f}$	veličina velikosti jalového výkonu ve trojfázové soustavě, jednotka $VAr$ ( <i>voltampér reaktanční</i> )

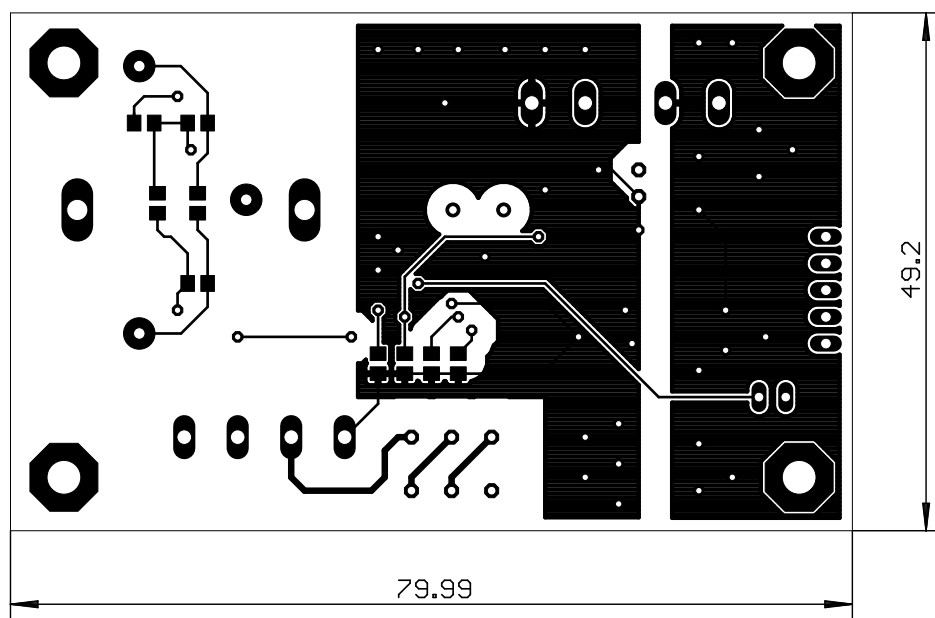
# A PŘÍLOHA - TESTOVACÍ DPS STPM10



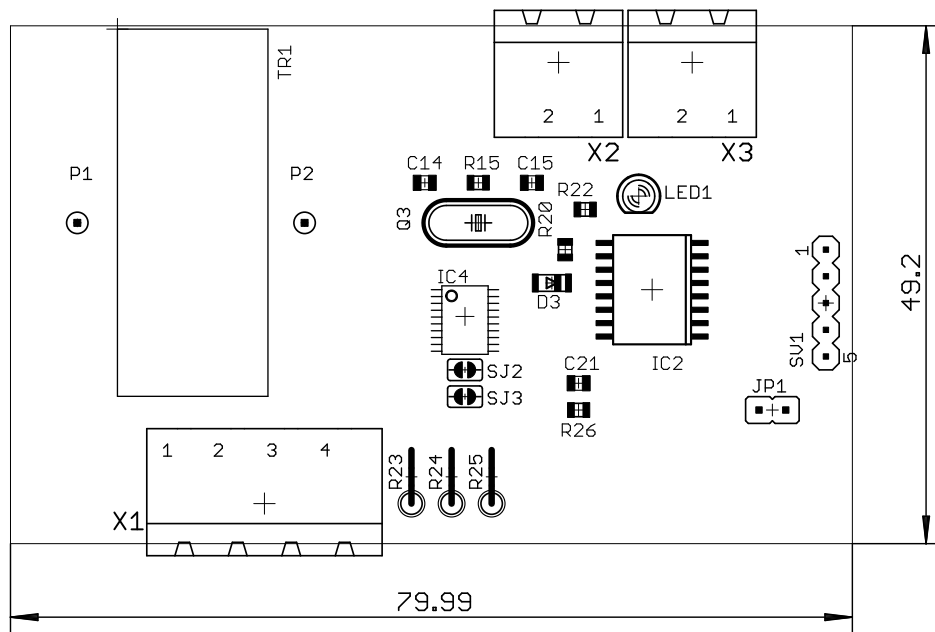
Obr. A.1: Schéma zapojení testovací DPS STPM10



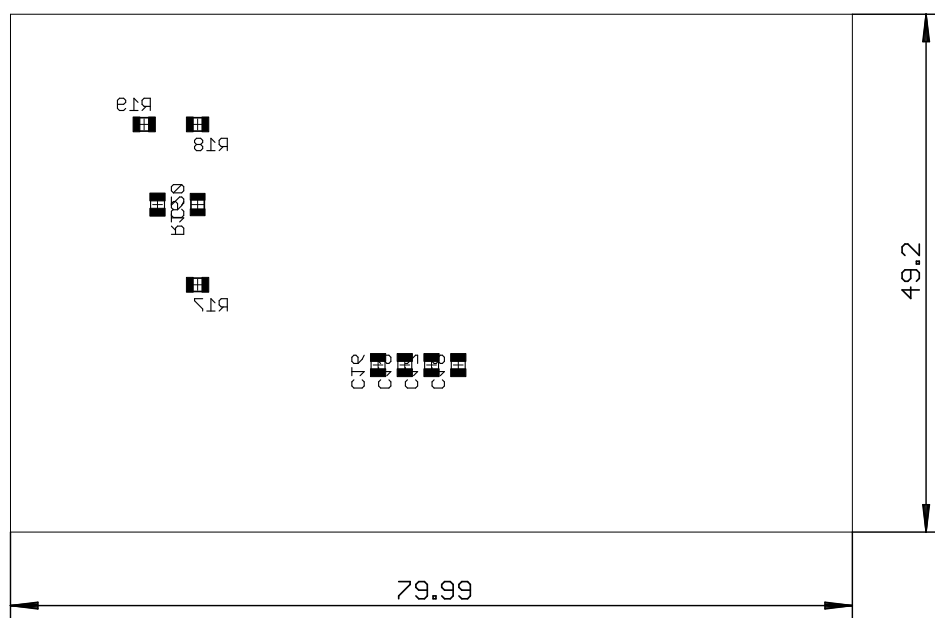
Obr. A.2: testovací DPS STPM10 - horní strana (TOP)



Obr. A.3: testovací DPS STPM10 - spodní strana (BOTTOM)

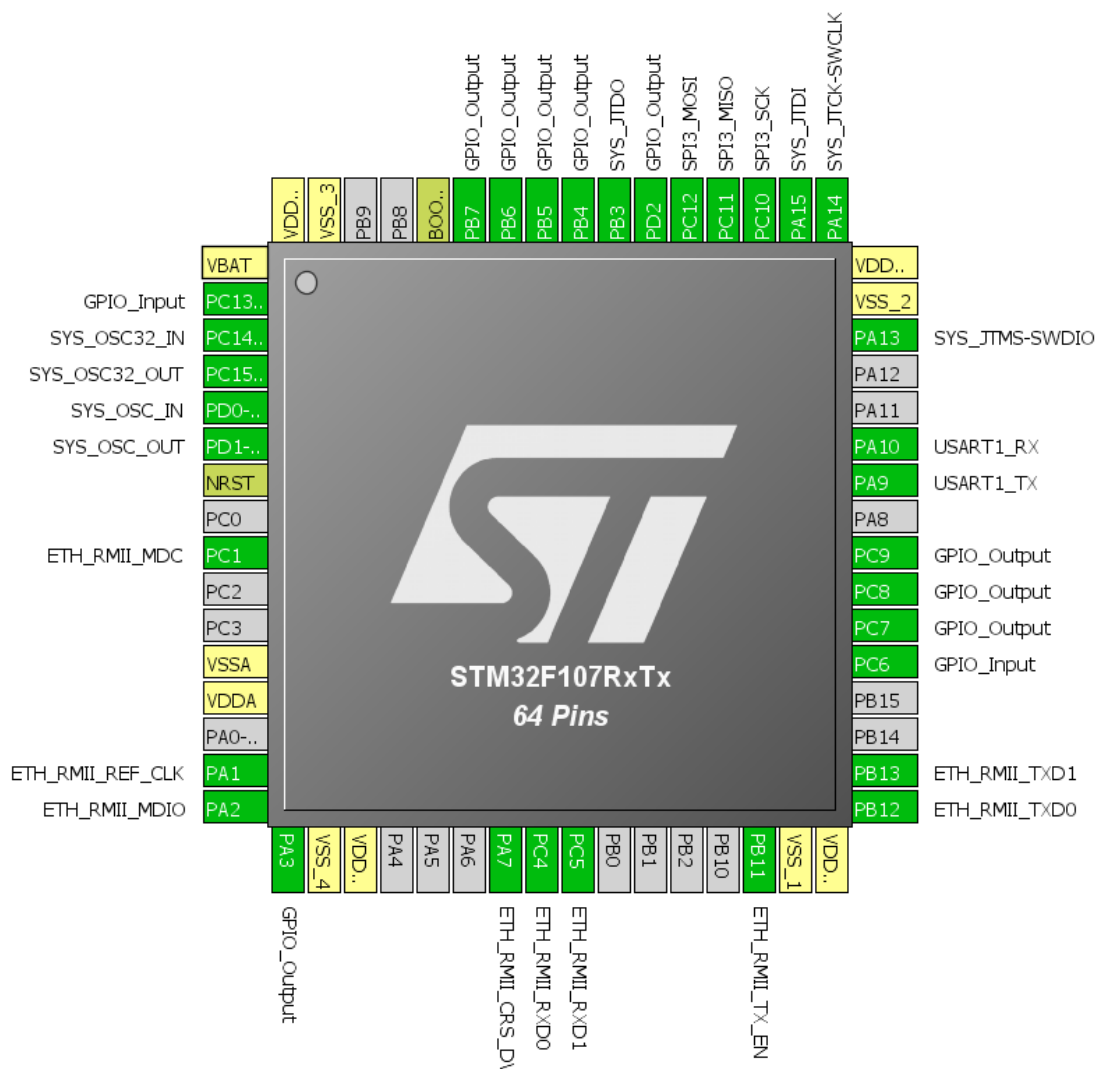


Obr. A.4: Osazovací plán testovací DPS STPM10 - horní strana (TOP)



Obr. A.5: Osazovací plán testovací DPS STPM10 - spodní strana (BOTTOM)

## B PŘÍLOHA - ANALYZÁTOR S MCU STMICRO-ELECTRONICS



Obr. B.1: Rozložení vývodů řídicího mikrokontroléru (export z programu MicroXplorer)

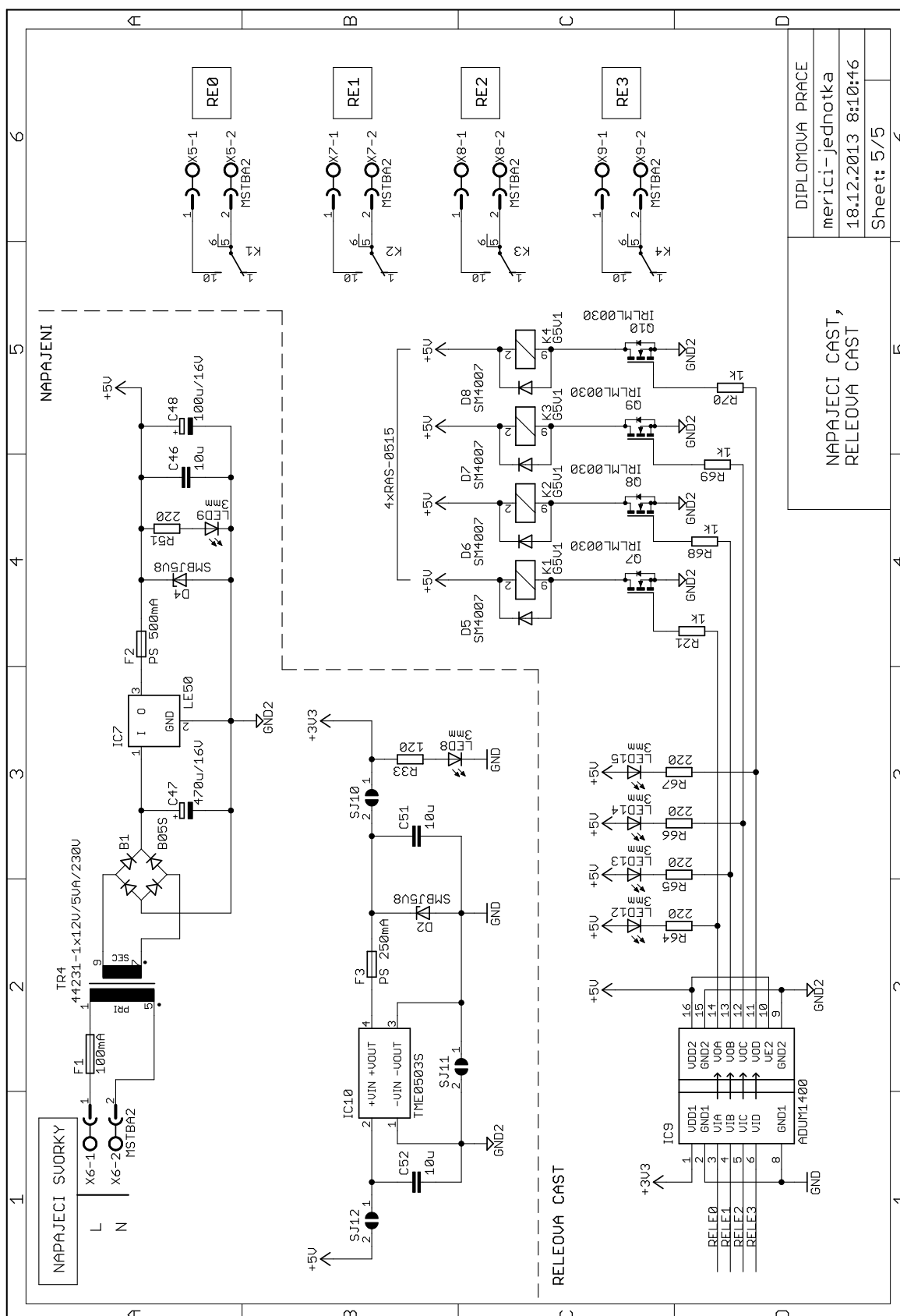






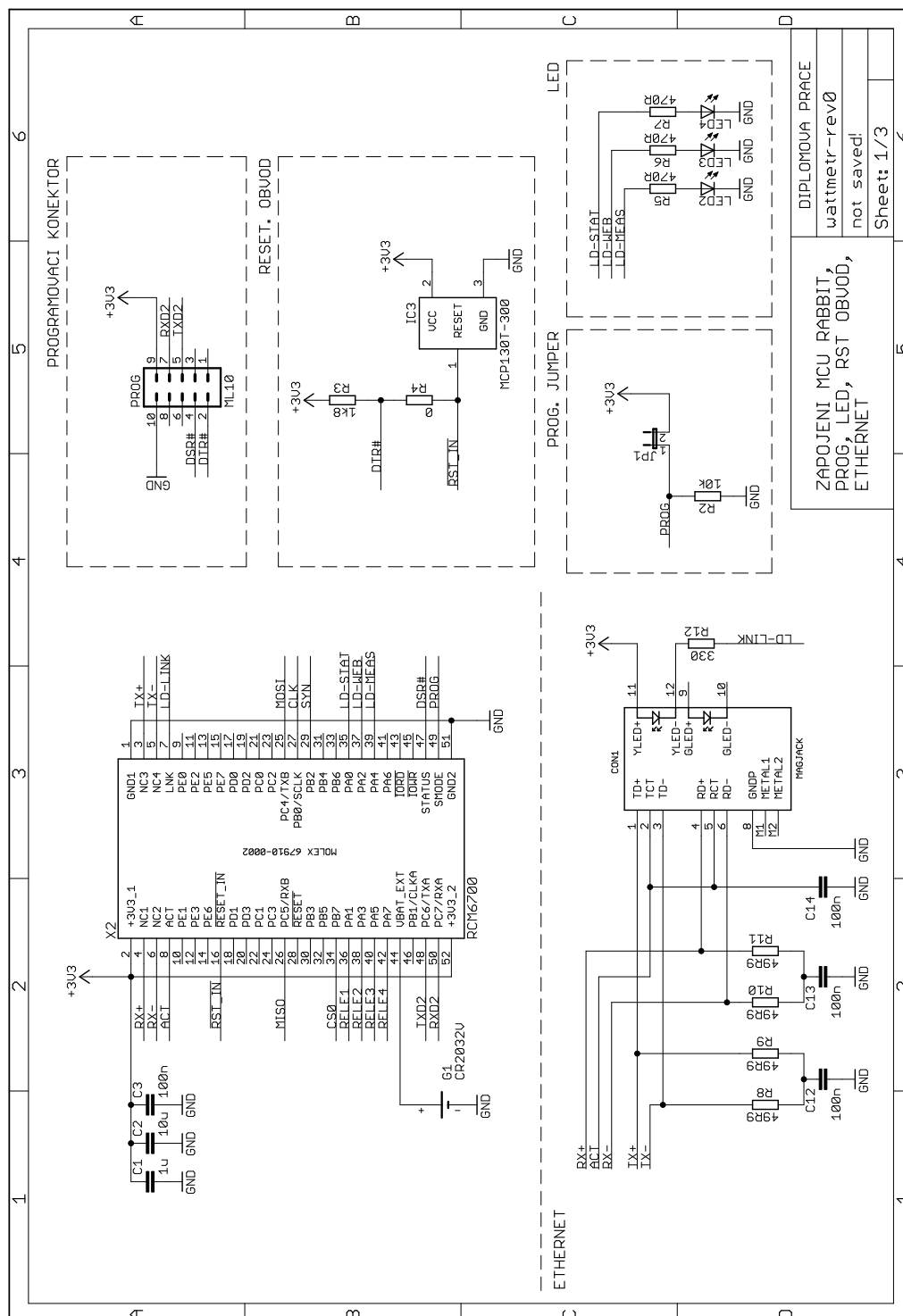






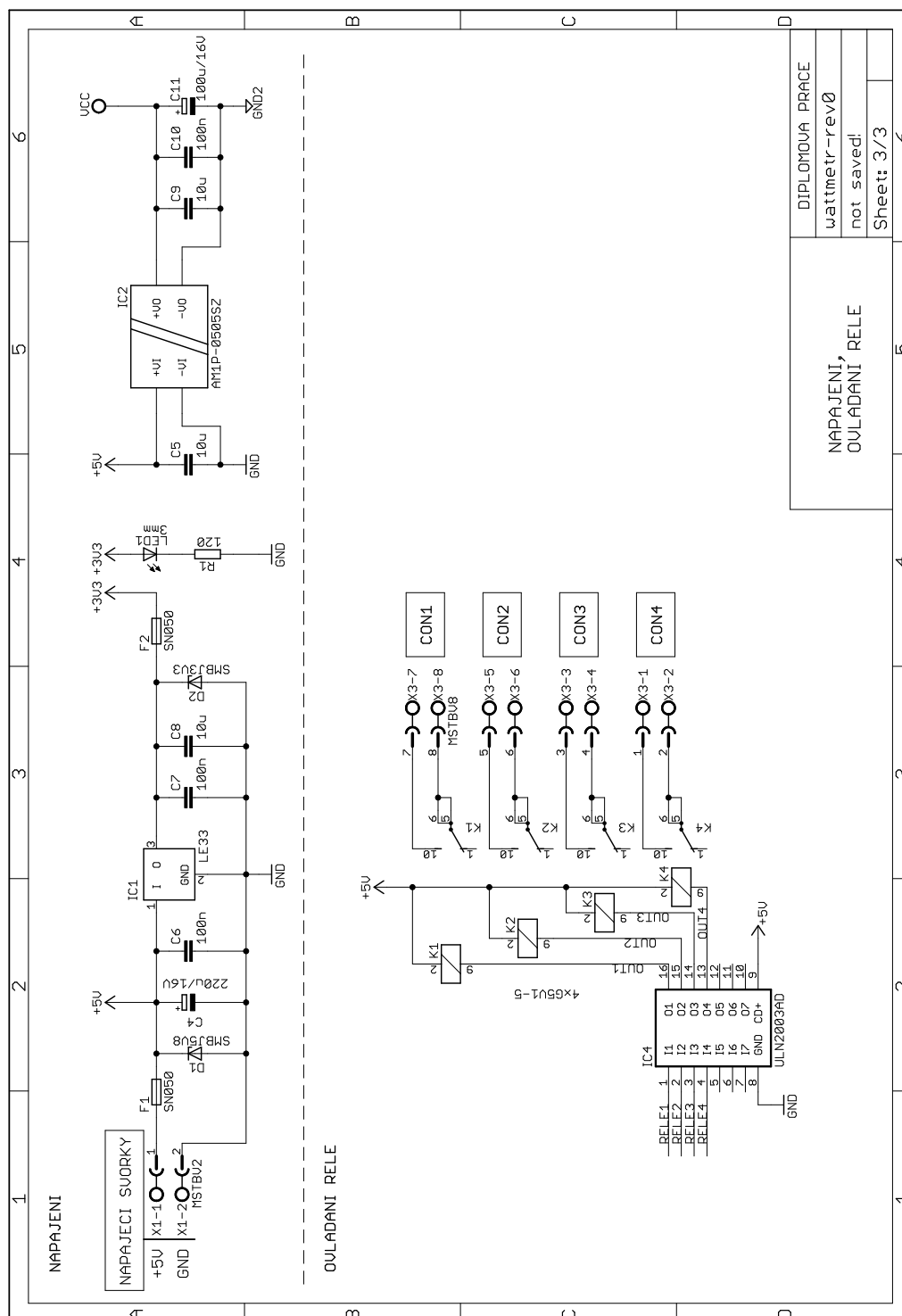
Obr. B.6: Zapojení napájecí části zařízení

# C PŘÍLOHA - ANALYZÁTOR S MCU RABBIT

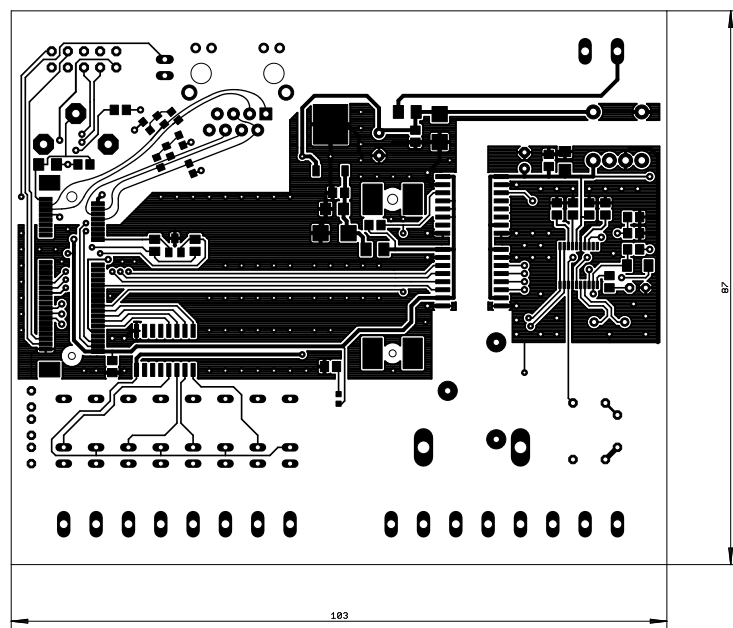


Obr. C.1: Zapojení MCU Rabbit, konektoru Ethernet a ostatních periférií

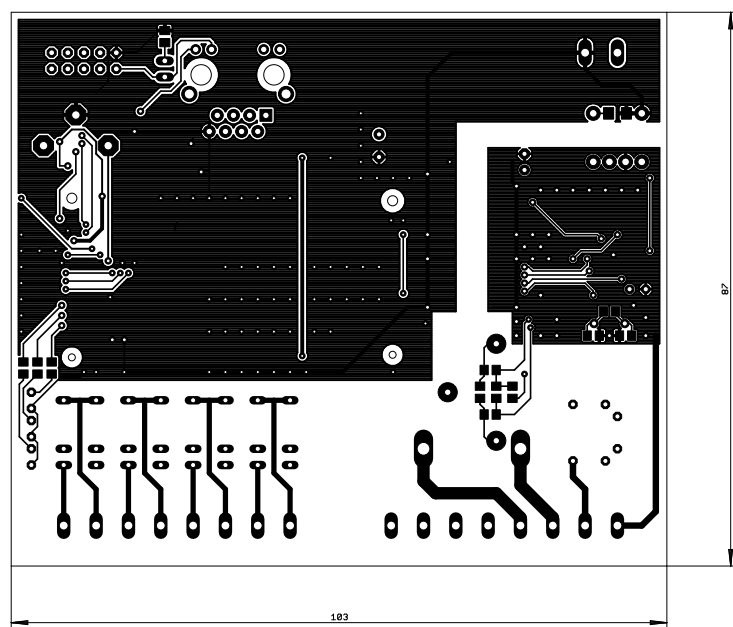




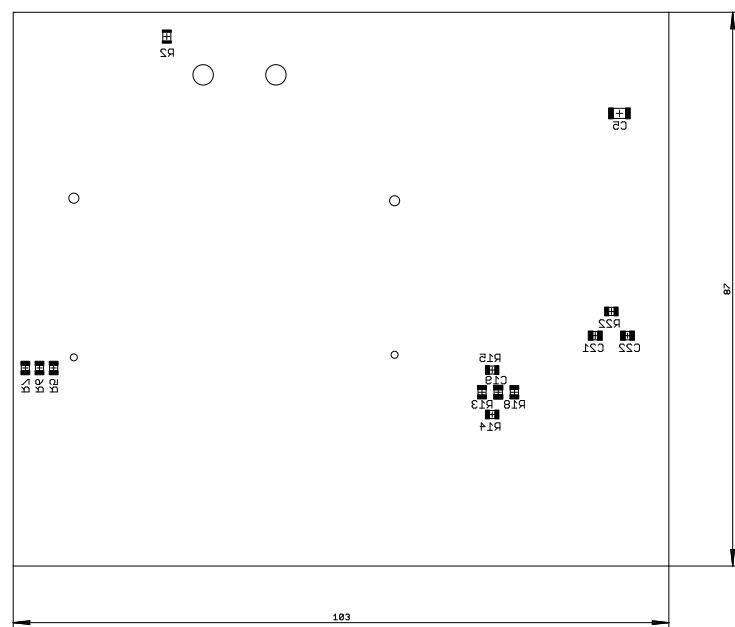
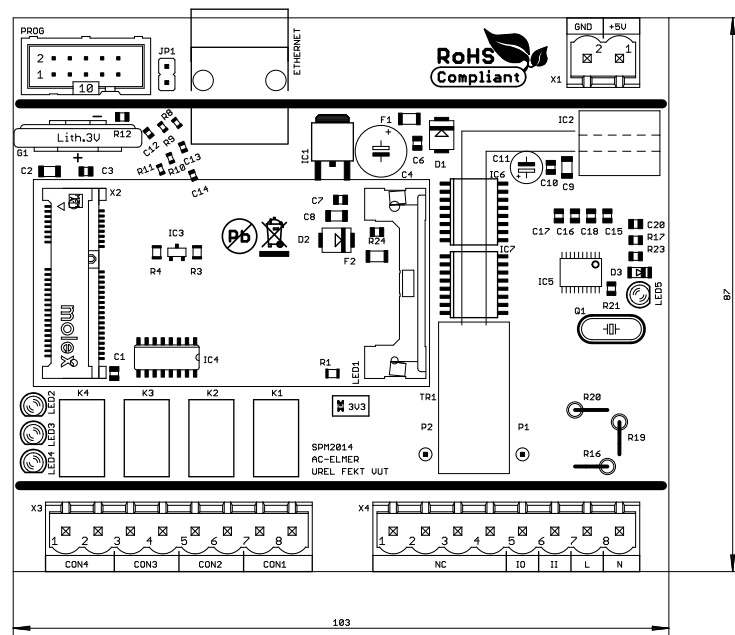
Obr. C.3: Zapojení napájecí části a ovládání kontaktů relé



Obr. C.4: Motiv DPS - horní strana (TOP)



Obr. C.5: Motiv DPS - spodní strana (BOTTOM)



## D PŘÍLOHA - ROZPIS MATERIÁLU

Tab. D.1: Seznam materiálu použitého pro konstrukci analyzátoru s MCU Rabbit

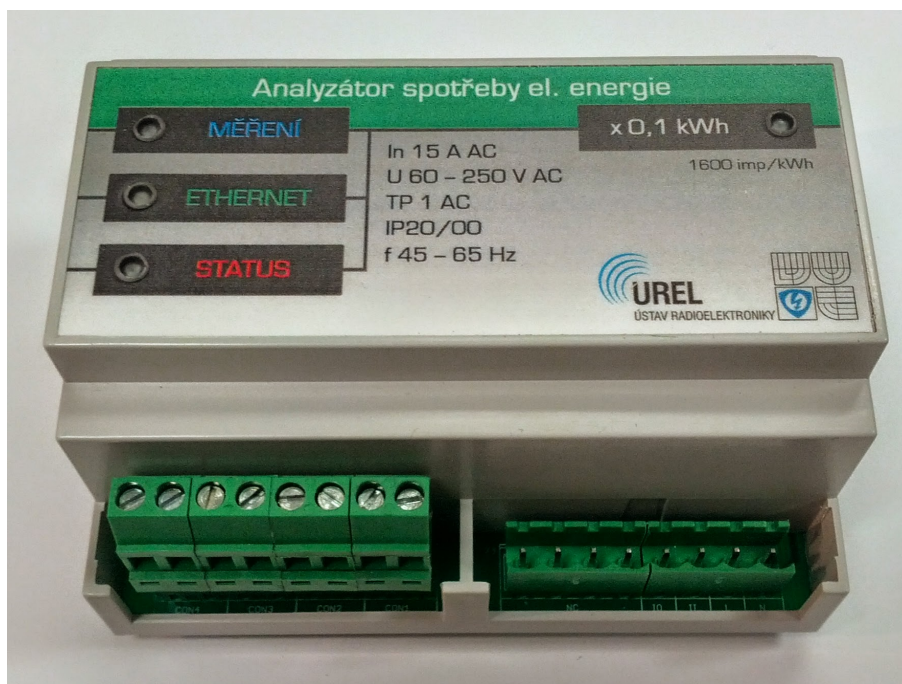
ks	Součástka	Hodnota	Poznámka	Reference
1	proud. transf.	AC1015	AC1015	TR1
1	IO	ADUM1400	SO16W	IC6
1	IO	ADUM1401	SO16W	IC7
1	DC/DC měnič	AM1P-0505SZ	AM1P-Z	IC2
3	kondenzátor	100 nF	SMD 0603	C12, C13, C14
4	kondenzátor	100 nF	SMD 0805	C3, C6, C7, C10
1	kondenzátor	10 nF	SMD 0805	C19
2	kondenzátor	15 pF	SMD 0805	C21, C22
1	kondenzátor	1 nF	SMD 0805	C16
4	kondenzátor	1 $\mu$ F	SMD 0805	C1, C15, C17, C18
1	kondenzátor	22 nF	SMD 0805	C20
4	kondenzátor	10 $\mu$ F	SMD 1206	C2, C5, C8, C9
1	kondenzátor	100 $\mu$ F 16 V	E2,5-5	C11
1	kondenzátor	220 $\mu$ F 16 V	E3,5-8	C4
1	baterie	CR2032V	CR2032V	G1
1	krystal	4 MHz	HC49/S	Q1
1	dioda	LL4148	MINIMELF	D3
4	relé	G5V1-5	G5V1	K1, K2, K3, K4
1	jumper	JP1E	kolíková lišta 2,54 mm	JP1
4	dioda LED	různé barvy	3 mm	LED2, LED3, LED4, LED5
1	dioda LED	červená	SMD 0603	LED1
1	konektor	LMJ1998824110DL1T39J	MAGJACK	CON1
1	stab. napětí	LE33	DPACK	IC1
1	IO	MCP130T-300	SOT23	IC3
1	konektor	ML10	HARTING ML10	PROG
pokračování tabulky na následující straně				



Tab. D.1 – pokračování

ks	součástka	hodnota	poznámka	reference
1	konektor	RCM6750	MINI PCI EXPRESS	X2
1	konektor	MSTBV2	MSTBV2	X1
2	konektor	MSTBV8	MSTBV8	X3, X4
3	rezistor	270 k $\Omega$	THT 0207/5V	R16, R19, R20
1	rezistor	0 $\Omega$	SMD 0805	R4
2	rezistor	10 k $\Omega$	SMD 0805	R2, R24
1	rezistor	120 $\Omega$	SMD 0805	R1
1	rezistor	1,8 k $\Omega$	SMD 0805	R3
4	rezistor	49,9 $\Omega$	SMD 0603	R8, R9, R10, R11
1	rezistor	1,8 $\Omega$	SMD 0805	R13
1	rezistor	1 M $\Omega$	SMD 0805	R22
2	rezistor	1 k $\Omega$	SMD 0805	R14, R15
1	rezistor	2,2 M $\Omega$	SMD 0805	R18
1	rezistor	330 $\Omega$	SMD 0805	R12
1	rezistor	3,3 k $\Omega$	SMD 0805	R23
5	rezistor	470 $\Omega$	SMD 0805	R5, R6, R7, R17, R21
2	pojistka	SN050	SMD 1206	F1, F2
1	IO	STPM10BRZ	TSSOP-20	IC5
1	IO	ULN2003A	SO16	IC4
1	transil	SMBJ3V3	SMB	D2
1	transil	SMBJ5V8	SMB	D1
4	světlovod	LC-6.0	—	
1	krabíčka	6MDH53/7.5	na DIN lištu	

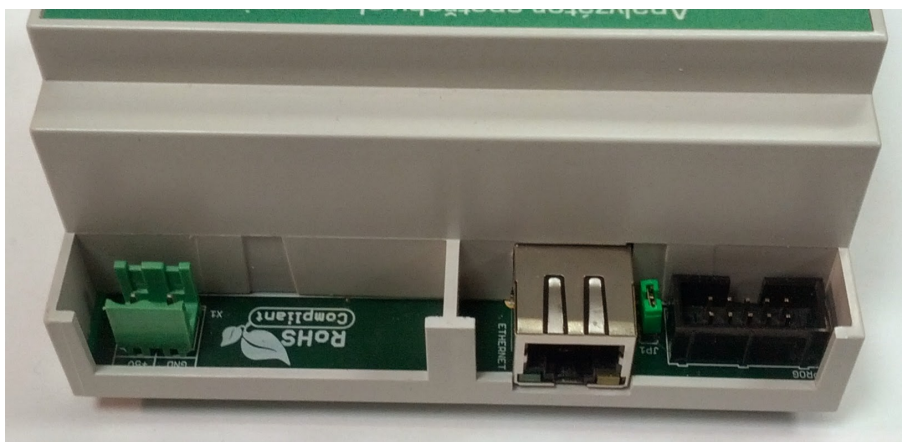
## E PŘÍLOHA - FOTODOKUMENTACE



Obr. E.1: Fotografie hotového analyzátoru spotřeby el. energie



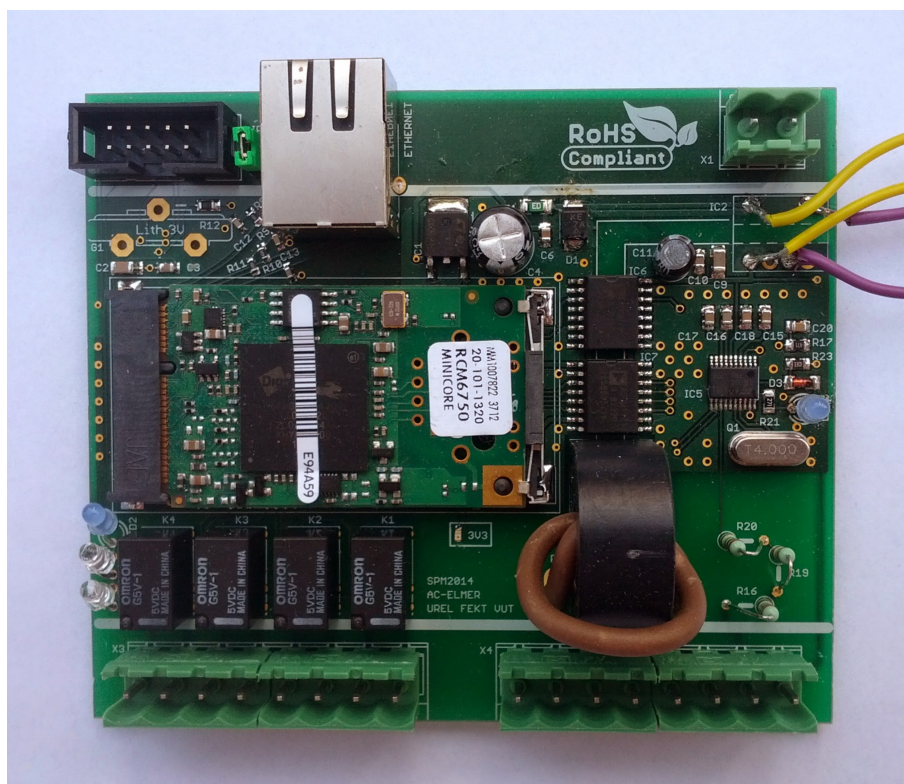
Obr. E.2: Detail signalizace stavu zařízení indikačními LED diodami



Obr. E.3: Detail konektoru MAGJACK, napájecího konektoru a programovacího konektoru



Obr. E.4: Detail připojení měřících svorek a svorek spínacích kontaktů relé (neosazené svorky tvoří rezervu pro případné inovace)



Obr. E.5: Detail připojení měřících svorek a svorek spínacích kontaktů relé (neosa-  
zené svorky tvoří rezervu pro případné inovace)

## **F OBSAH ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH**

- Elektronická verze diplomové práce (pdf)
- Balíček zdrojových souborů
- Zdrojové soubory návrhu elektronických schémat a DPS (Eagle)